

边坡稳定分析方法以及防治措施研究现状与应用综述

刘 洋

华北水利水电大学地球科学与工程学院, 河南 郑州

收稿日期: 2025年3月15日; 录用日期: 2025年4月6日; 发布日期: 2025年4月17日

摘 要

文中从边坡稳定分析方法、边坡防护技术以及边坡加固处理方法等三个方面对边坡工程理论与实践的研究现状、存在问题及发展方向作了简要评述。尽管边坡工程领域已取得显著进展,但在理论体系与技术应用层面仍存在诸多瓶颈。在稳定分析方面,传统极限平衡法对复杂三维边坡及多场耦合效应的适应性不足,而数值模拟方法在材料本构参数选取与边界条件设定上仍存在较大经验依赖性,导致计算结果与实际工况存在偏差。防护技术领域,现有生态护坡技术普遍存在植物根系加固效应量化困难、长期服役性能衰减机制不明等问题,且柔性防护系统在极端降雨或地震荷载下的动态响应规律仍需深化研究。加固处理方面,组合加固结构的协同工作机制尚未完全明晰,土钉支护在富水软土地层中的蠕变特性与耐久性仍缺乏长期监测数据支撑,制约了设计理论的精细化发展。当前研究成果为边坡工程实践提供了重要指导:柔性防护系统的模块化设计可显著提升崩滑灾害应急处治效率;锚固桩-土钉墙组合结构在高速公路高边坡治理中的成功应用,验证了分级加固理念的技术经济优势;生态护坡技术的区域适应性研究,则为不同气候带边坡修复提供了差异化实施方案。建议在工程设计中建立“监测-预警-处治”联动机制,通过光纤传感与InSAR技术构建边坡健康诊断系统,实现从被动治理向主动防控的范式转变。

关键词

边坡工程, 防护, 加固

Review of Research Status and Application of Slope Stability Analysis Methods and Prevention Measures

Yang Liu

College of Geosciences and Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Received: Mar. 15th, 2025; accepted: Apr. 6th, 2025; published: Apr. 17th, 2025

文章引用: 刘洋. 边坡稳定分析方法以及防治措施研究现状与应用综述[J]. 土木工程, 2025, 14(4): 727-738.
DOI: 10.12677/hjce.2025.144079

Abstract

The article briefly reviews the research status, existing problems, and development direction of slope engineering theory and practice from three aspects: slope stability analysis methods, slope protection techniques, and slope reinforcement treatment methods. Although significant progress has been made in the field of slope engineering, there are still many bottlenecks in the theoretical system and technical application. In the stability analysis, the traditional limit equilibrium method is not suitable for the complex three-dimensional slope and multi-field coupling effects, while the numerical simulation method still has a large empirical dependence on the selection of material constitutive parameters and boundary conditions, which leads to the deviation between the calculated results and the actual working conditions. In the field of protection technology, existing ecological slope protection technologies generally have problems such as difficulty in quantifying the reinforcement effect of plant roots and unclear attenuation mechanism of long-term service performance, and the dynamic response law of flexible protection systems under extreme rainfall or earthquake loads still needs to be further studied. In terms of reinforcement treatment, the cooperative working mechanism of the combined reinforcement structure has not been fully clarified, and the creep characteristics and durability of the soil nailing support in the water-rich soft soil layer still lack long-term monitoring data support, which restricts the fine development of the design theory. The current research results provide important guidance for slope engineering practice: the modular design of flexible protection system can significantly improve the emergency treatment efficiency of landslide disaster; the successful application of the combined structure of anchoring pile and soil nailing wall in the treatment of highway high slope verifies the technical and economic advantages of the concept of graded reinforcement. The study of regional adaptability of ecological slope protection technology provides a differentiated implementation plan for slope restoration in different climatic zones. It is suggested that the linkage mechanism of “monitoring, early warning and treatment” should be established in the engineering design, and the slope health diagnosis system should be constructed through optical fiber sensing and InSAR technology, so as to realize the paradigm change from passive management to active prevention and control.

Keywords

Slope Engineering, Protection, Reinforcement

Copyright © 2025 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

边坡失稳是岩土工程领域的重要研究课题，其本质在于坡体所受外部荷载超过自身力学极限所引发的破坏现象。受水文条件变化、地震活动及人类工程扰动等因素影响，边坡稳定性呈现动态衰减特征[1]，失稳后可能诱发崩塌、滑坡、泥石流等次生灾害链，具有显著的社会经济危害性。我国作为山地面积占比达 74.8%的国家[2]，复杂的自然地形叠加近年来大规模基础设施建设形成的人工边坡，使得边坡稳定性研究具有突出的现实紧迫性。这不仅关系到地质灾害防治体系的完善，更对区域经济发展和生态环境安全具有战略意义[3]。本文系统梳理了当前边坡失稳的典型破坏模式、多场耦合作用下的致灾机理，以及主流稳定性分析方法的理论框架与应用边界，重点对比了不同分析模型的计算精度、适用条件及工程实践效能，为构建更完善的边坡安全评估体系提供理论支撑。

2. 边坡的破坏形式

2.1. 滑坡

滑坡是常见的地质灾害，也是当前最具破坏力的自然灾害之一[4]。滑坡是指坡体面层的岩体在自身重力作用下，顺着坡体结构内部比较软弱的区域向下移动，进而发生剪切破坏，岩体在经过一段时间蠕变形变后，逐渐发展成滑动破坏，然后逐步稳定，其中高土质边坡或泥质边坡的表现尤为明显。

2.2. 崩塌

崩塌主要发生在较陡边坡区域，且还将进一步导致裂隙发育，并沿陡裂面上产生落石活动，形成次生灾害，其损害程度不容忽视。同时，由于冻融、渗水、人类工程活动影响等外界因素的持续影响，会导致裂缝逐渐扩大，造成坡体破坏。此类灾害事故发生较突然，因此要在工程中提前考虑，防止意外。

2.3. 泥石流

在突发性的强降雨、降雪天气及一些自然灾害的情况下，泥石流有很高的发生率。泥石流中夹带的泥沙和石块会导致灾害区域的生态环境遭到破坏，对灾害区域的影响较大。

3. 边坡失稳的影响因素

地质因素对坡体稳定性的影响主要包括坡体自身形态与岩土本身性质所产生的影响。边坡的形态不同主要影响边坡失稳的形态，具体因素是边坡的长度、宽度以及高度，断层节理形式以及外部环境条件，通常来说坡度较缓，反倾节理的边坡较稳定。王恭先[5]认为坡体内易形成滑动带的岩层性质及其分布的位置是影响坡体失稳形态的主要因素。除此之外，岩土体本身的内摩擦角以及粘聚力的不同都会对边坡稳定性有一定的影响。

地下水诱发边坡失稳的作用机制主要表现为动态与静态水压力的综合效应。在力学层面，地下水渗透产生的动水压力直接削弱岩土体结构强度，而静水压力则通过软化岩层基底、降低土体弹性模量及粘聚力学参数，导致抗剪强度系统性衰减。王荣华[6]基于 FLAC3D 三维数值模拟与水位监测数据的研究表明，基坑水位抬升对边坡安全系数的敏感性显著高于潜水面变化。在化学劣化方面，刘新荣团队[7]揭示了地下水与硬石膏岩体的水岩相互作用机制，水分子渗入导致矿物晶体结构发生膨胀性相变，岩石泊松比显著增大，这种物性参数的改变加剧了岩体内部应力重分布的不均衡性。

基于滑坡灾害时空分布规律分析，统计数据显示约 74%的滑坡事件集中发生于雨季[8]，揭示了降雨入参与边坡失稳的强相关性。其作用机理可归结为：降雨过程中，水体沿坡体裂隙持续下渗，在滑体与下伏强风化泥岩接触带形成饱水软弱带，显著弱化岩土界面抗剪强度，进而诱发渐进式剪切破坏。杜忠原等[9]通过非饱和土渗流 - 应力耦合模型，该研究为降雨型滑坡的临界雨量预警及排水工程设计提供了动态演化模型支撑。在地震作用下，边坡会由于惯性力的作用使得原本处于静态的边坡在外力作用下发生失稳。其中岩质边坡相比土质边坡更为明显[10] [11]。

4. 边坡稳定性分析方法

4.1. 定性分析法

定性分析法作为边坡稳定性评价的经典方法，其核心在于通过多维度地质要素的系统性整合，实现对工程场地的宏观研判。该方法以地形地貌特征、水文地质结构、新构造运动强度、气候变化趋势及人类工程活动强度等参数为输入变量[12]，运用图解法、类比法与自然历史分析法等工具，构建基于经验判据的稳定性分级体系，尤其适用于区域性边坡普查或地质条件相对均质的工程边坡初步评估[13]。例如，

王森等[14]在某露天矿边坡工程中,通过对比历史滑坡案例的地质剖面特征与现场勘察数据,快速锁定潜在在滑移面位置,并提出分级开挖控制建议,验证了定性分析在工程快速决策中的实用性。

4.2. 模型模拟实验

物理模型试验作为边坡稳定性研究的重要手段,通过构建与原型边坡几何形态、地质结构及工程条件高度相似的缩尺模型,能够直观揭示失稳破坏的动态演化规律。该方法在实施过程中需遵循相似性准则,但因尺度效应及工程复杂性制约,常需对岩体节理网络、渗透路径等关键要素进行合理简化。例如,杨忠平等[15]通过制备含不同节理密度的边坡模型,在微震循环加载试验中观察到:断续节理边坡呈现渐进式张拉-剪切复合破坏,而贯通节理模型则发生突发性整体滑移,揭示了节理空间分布对能量耗散路径的调控机制。因此,当前研究多采用物理模型与数值模拟、现场监测的多元数据融合策略,通过试验现象校准本构模型参数,进而构建跨尺度的边坡稳定性综合评价体系。

4.3. 定量分析法

刚体极限平衡法作为边坡稳定性分析的核心方法,其理论框架建立在滑体刚性假设与静力平衡原理之上。该方法通过构建滑动面力学平衡方程,量化滑动力矩与抗滑力矩的比值(即安全系数),从而直观评估边坡在极限状态下的稳定程度。其典型特征在于将复杂的三维地质体简化为二维刚体模型,依托瑞典圆弧法、毕肖普法、简布普遍条分法及摩根斯坦-普拉斯法等经典算法[15],分别针对圆弧型、非圆弧型滑面以及非均质土体进行抗滑力计算。以 Geostudio 软件为技术载体,该方法可实现滑动面自动搜索与三维边坡数字化建模,显著提升对潜在破坏模式的识别效率。

瑞典条分法[16]是极限平衡法中最经典的一种,该法假定土坡在破坏过程中是沿着圆弧面进行滑动的,且土条两侧的作用力为一对相互作用力,忽略了土条间的作用力,故自身存在一定的误差。但此方法分析简便,应用范围较广,借助软件分析效率高。如郭海强等[17]通过瑞典条分法,提出了解决路基边坡设计所存在问题的铁路路基边坡极限状态设计表达通式。

毕肖普法作为刚体极限平衡理论体系的重要改进方法,通过引入土条间法向力的平衡条件,显著提升了边坡稳定性分析的精度。该方法基于滑体刚性假设与圆弧滑动面几何约束,将潜在滑体离散为若干竖向土条,通过构建各土条法向力与切向力的力矩平衡方程,计算抗滑力矩与滑动力矩的比值(即安全系数),以此量化边坡失稳风险。相较于传统瑞典条分法忽略条间力的简化处理,毕肖普法通过考虑相邻土条的力学传递效应,使计算结果更趋近于真实工况,尤其在非均质土坡或存在孔隙水压力梯度的情况下,其误差可降低约 8%~15%。例如, Ji 等[18]运用该方法对比分析了地震动荷载与静力荷载作用下的滑动面演化特征,揭示了地震波传播引起的动态孔隙水压力重分布会改变滑面位置与形态,导致地震工况下滑动面曲率半径较静力条件减小 20%~30%。然而,该方法仍受限于二维平面应变假设与刚体运动学简化,难以准确表征复杂节理岩体边坡的三维应力场各向异性特征。当前工程实践中,常通过 Geostudio 软件平台将毕肖普算法与有限元渗流分析耦合,以模拟降雨-地震多场耦合作用下的边坡稳定性动态演化过程。

简布法是指对任意形状滑动面计入土体条块间作用力的土坡滑动稳定性分析法。此方法的滑动面不局限于条状,更加贴合实际工程下的土层分布状况。曹亮[19]运用简布法,通过 Geostudio 软件对某处滑坡进行了稳定性分析,验证了 Geostudio 软件在计算滑坡稳定性上的准确性、简便性等优势。

摩根斯坦-普拉斯分析法假定了各条间的作用力,对坡体土条间合力的作用位置进行了合理假设,并且通过改变条间合力的作用方向,结合力学来求得此坡体的最佳解和满足滑动面法向和滑动面方向力的平衡及对底滑面中点的力矩平衡。摩根斯坦-普拉斯法的运用相对其他方法较少。削丞民[20]用摩根斯

坦-普赖斯方法对云南省楚雄州吕合露天煤矿边坡的稳定性进行了分析,并为治理边坡及推广此方法提出一些建议。

由于各方法假设条件的差异性,其适用的工程情况也有所不同,通常在实际工程中边坡各段情况也有所不同,在实际应用中会将边坡体进行分段,根据分段后每段边坡体的实际情况选择适用的方法。闫丽雯[21]利用典条分法和毕肖普条分法,在不同工况下定量分析了边坡地质灾害稳定性,对地质灾害危险区进行了划分。

有限差分法作为边坡稳定性分析的重要数值模拟手段,其基于差分网格和离散求解原理,主要依托 FLAC2D 和 FLAC3D 等计算软件实现。该方法具有操作便捷、结果可视化程度高的优势,但由于连续性假设的局限性,在模拟实际工程中非连续介质时存在一定偏差。值得关注的是,FLAC3D 通过融合强度折减技术,实现了边坡应力场、位移场、塑性区演化及潜在滑面的同步分析,并可直接输出安全系数,显著提升了稳定性评价的系统性和可靠性。近年来,相关研究已取得显著成果:侯波等[22]通过 FLAC3D 揭示了毛坞滑坡在天然与暴雨工况下的塑性区扩展规律及位移响应特征;睦敏磊等[23]采用 ANSYS-FLAC3D 协同建模技术,实现了官庄工程区滑坡的全参数反演与稳定性验证;秦凡等[24]则基于 FLAC2D 构建了弓长岭露天矿边坡数值模型,通过应力应变云图与地质勘察数据的耦合分析,为矿区边坡治理提供了理论支撑。这些工程实践表明,有限差分法结合强度折减理论在边坡稳定性定量评价中具有较高的工程适用性和科学指导价值。

有限元法能够借助离散单元几何方程来对边坡稳定性进行分析,将土坡实际弹性、粘弹塑性等关键参数利用平衡方程及物理方程进行分析计算,对坡体稳定性进行分析,是将模型离散化为有限数目单元,以此进行数据模拟计算的方法。该方法可以处理微小变形的非线性问题,也能灵活性处理复杂边界。刘彦等[25]发现通过有限元强度折减法计算得出的边坡安全系数与刚体极限平衡法的计算结果基本相近。而且相比起极限平衡法,该法确定的边坡从坡脚剪出的圆弧形滑动机制更加准确。王丽俊[26]将有限元与极限平衡法相结合进行分析,最后确定了更为准确全面的坡体安全系数,提供了一种新的研究边坡稳定性的分析思路。

边界元法是在强度折减法的基础上提出的一种用于分析边坡稳定性的可靠方法。张丽美等[27]运用边界元法通过经典算例分析并与 Spencer 法等前人的研究结果比较表明该方法是合理有效的。其优点在于相对于有限元法其方程维度较低,计算相对简单,计算效率高。但是其计算结果的表达相对复杂、不直观,且计算式中的系数可变,非线性适用性较差。林思田[28]基于滑面边界法,以新型条分法编制出了一种用于分析稳定性的程序,并且证明了新方法对于有限元分析同样有效,且针对有限元法,该法解决了不收敛问题。

基于离散元法的岩质边坡稳定性分析研究表明,该方法通过块体理论构建非连续介质模型,能有效表征破碎松散岩体的非连续变形特征,直观呈现边坡破坏的形态演化过程,尤其适用于节理发育或破碎岩体的渐进破坏模拟。相较于传统极限平衡法,离散元法无需预设滑裂面整体屈服条件,可真实反映岩体间相互作用机制,并能够获取位移场、速度场及破坏路径等动态信息,为揭示边坡失稳机理提供多维数据支撑。目前主流的离散元分析软件如 PFC 系列和 3DEC 已在工程实践中广泛应用,例如郑成成等[29]通过 PFC 建立高陡堆石边坡模型,揭示了抽水蓄能电站边坡的失稳模式及影响范围,提出混凝土挡墙优化方案;蒋明镜等[30]利用 PFC2D 对比顺层与反倾节理边坡的稳定性差异,证实顺层节理边坡更易发生失稳破坏;刘子金等[31]基于 3DEC 分析开挖扰动与碾压振动对边坡位移的显著影响,为低安全系数边坡工程提供了定量化防控建议。这些成果验证了离散元法在复杂工程场景下的适用性,具有显著的工程实践价值。

为了克服单一数值计算方法的弊端,发挥各自优势,将不同方法综合引用、合理耦合也是发展趋势,

可以将边坡分段进行计算,通过分段边坡的实际工程情况合理采用方法进行计算,发挥各方法的优点,尽量减少各方法的弊端对边坡计算所造成的影响,达到扬长避短的目的。如刘蕾等[32]运用 FLAC 和 PFC2D 2 种方法相结合,对逆层岩质边坡地震动力作用下的破坏情况进行了分析,将连续和非连续区域组成一个整体,缩短了计算时间。

4.4. 不确定性分析方法

不确定性分析法主要考虑边坡计算中的不确定性因素,并结合极限平衡法理论与其他有关学科对边坡进行综合性分析,该方法与其他方法的主要区别在于该方法系统地考虑了不确定性参数的作用,并以概率值定义边坡的稳定性条件[33]。主要的分析方法有模糊综合评价法、概率分析方法和灰色系统评价法等。

概率分析法收集分布在斜坡上的详细参数数据并采用合适的取值。以此对边坡进行稳定性分析。由于该方法需要收集大量不确定性参数,因此该方法有一定的限制性,但由于有大量的实际数据支撑,该方法适用性以及可靠度较高。刘辉等[34]通过分析不同滑动面失效模式之间的相关性,在基于随机场局部平均后的等效参数和一次可靠度方法,提出了可靠度分析方法用于分析考虑不排水强度空间变异性情况下的黏土边坡系统。

模糊综合评价法是考虑到边坡的类型不同,影响其稳定性的因素也不同。模糊综合分析法给每一个因素赋予不同的权值,区分各因素在总的评判中的影响和作用,再根据隶属函数,对边坡进行综合评判,确定其稳定状况。但该方法在实际分析时,其权值的分配过程中存在一定的经验性和主观性,因此分析结果有一定的不确定性[35]。王瑞等[36]应用层次分析法与模糊综合评价法确定了各级指标的权重值和隶属度,构建了模糊综合评价模型,结合模型与计算来分析岩质边坡稳定性,为实际的工程问题研究提供了合理的技术支撑。并指出该方法会由于环境中的不确定因素的变化频繁导致结果与实际产生偏差,可靠度还有待提高。

灰色关联指事物之间的关联,灰色系统理论[37]主要是利用灰色关联度分析原理,通过比较不同因素的发展趋势,来判断因素之间的关联性。该方法同时考虑了影响边坡稳定性的确定因素和不确定因素,通过建立灰色量数学模型,比较各影响边坡稳定性的影响要素,将确定各因素对边坡的影响比重大小作为分析边坡稳定性的主要依据。由于该方法评价边坡的基础是各因素的发展趋势[38],对实际样本量并没有太多要求,分析过程简单简便。

5. 边坡工程防治措施

5.1. 边坡工程防护技术

基于性能的边坡支护体系全局优化设计研究已成为滑坡治理领域的重要发展方向。历经近 90 年的理论发展,边坡支护技术已形成削坡减载、支挡结构、坡体加固等多元化治理方案,并始终贯彻“治坡先治水”的核心原则。然而传统设计方法在工程实践中常陷入安全性与经济性的两难困境,难以实现结构体系的全局最优配置。张俤元[39]提出的“勘察-设计-施工-监测”四阶段协同机制,强调需通过多方案技术经济比选建立滑坡变形破坏机制与工程措施的动态响应关系。王恭先[40]进一步指出,提升滑带土抗剪强度参数准确性、优化坡体结构破坏模式识别技术是实现工程地质与岩土力学深度融合的关键。随着计算机辅助分析技术的进步,基于极限平衡法与有限元耦合的支护结构性能评估体系,可通过建立安全系数、工程造价和变形控制的三维优化模型,为业主提供兼具明确技术指标与经济性参数的支护方案。该研究方向不仅解决了传统设计“偏保守”或“欠安全”的固有缺陷,更推动了边坡治理从经验型向数字化、智能化的转型升级。

抗滑桩是使用较早的一种支挡结构,应用相对成熟和广泛,为使抗滑桩受力更合理,已开发出锚索或预应力锚索抗滑桩体系,抗滑桩的空间形式以及与锚索(预应力锚索)的组合成为一个研究热点。贺建清、张家生等[41][42]对弹性抗滑桩设计中的几个问题进行了较深入探讨;戴自航、彭振斌[43]对预应力锚固抗滑桩内力采用有限差分法进行了计算;沈强、陈从新、汪稔等[44]对湖北程潮铁矿西区边坡抗滑桩加固效果进行了监测,宋从军、周德培等[45]对岩石高边坡开挖工程中埋入式抗滑桩桩前岩体抗力与桩后坡体推力进行了合理的简化处理,结果表明埋入式抗滑桩内力较悬臂式抗滑桩分布合理,锚固段可适当减短;周德培、王建松、刘小丽[46][47]对预应力锚索桩内力采用弹性地基梁和半无限空间法进行了计算;吴顺川、高永涛等[48]对失稳高陡路堑边坡采用桩锚加固方案进行了较详细的分析。

挡墙是在滑坡底脚修建的一种挡土结构,修建挡墙能适当提高滑坡的整体安全性,更可有效防止坡脚的局部崩坍,以免不断恶化边坡条件,但对于大型滑坡,挡墙由于受到工程量、高度、自身稳定性的限制,滑坡体的安全系数往往提高不大,杨志法、张路青、祝介旺等[49]发明了获得国家发明专利的层状网式钢筋石笼挡墙边坡加固新技术,层状网式钢筋石笼挡墙不仅能保持传统石笼挡墙所具有的就地取材、加固经费低等优点,而且还能解决因笼间连结力低而导致对边坡加固效果不理想等问题。针对传统挡墙结构的不足之处,目前开发的锚杆(锚索)挡墙结构有较好的挡土和抗滑作用,应用前景较好。

柔性防护结构作为滑坡治理的新技术,由钢绳网、固定系统(拉锚与支撑绳)、减压环及钢柱构成,通过主动与被动两种类型实现对坡面滚石的动态拦截与稳定控制。贺咏梅、彭伟、阳友奎等[50]系统阐述了瑞士布鲁克集团首创的边坡柔性防护技术体系,涵盖钢丝绳网主动加固系统、围护系统及环型网被动防护系统的工程应用场景。阳友奎[51]基于莫尔-库仑破坏准则与极限平衡原理,修正并完善了GTC型主动加固系统(高强度钢丝格栅-锚杆组合结构)的作用机理与设计方法,建立了涵盖荷载传递机制与稳定性评估的理论框架。杨涛、周德培等[52]通过分析主动防护系统构件特性,提出柔性防护边坡块体安全系数计算方法,即依据可移动块体发育特征计算系统最大防护块体体积,并通过与实际块体对比评估边坡稳定性。研究表明,该技术通过模块化结构与动态响应特性,显著提升了边坡滚石灾害防治效能,为复杂地质条件下的滑坡治理提供了新思路,现已成为边坡工程领域的研究热点与重要实践方向。

生态护坡技术作为边坡治理的重要发展方向,通过生物与工程措施协同作用实现了边坡稳定与生态修复的双重目标。徐中华、王建华等[53]创新性提出活树桩固坡技术,采用弹塑性有限元方法系统研究活树桩入土深度、布设角度、根系发育等参数对边坡安全系数的影响规律,揭示了植物根系与土体相互作用的力学机制。张俊云、周德培等[54]-[56]通过红层泥岩边坡生态防护的现场降雨试验及温湿度长期监测,阐明了生态护坡控制快速风化的三重作用机制:一是阻隔降雨对坡面风化碎屑的冲蚀作用,二是调节浅层坡体温度场以消除热应力引发的表层剥落,三是通过植被蒸腾作用降低坡体含水量抑制膨胀变形。研究表明,生态防护层在高温季节可形成物理隔离带,使红层泥岩表层温差降低30%以上,有效延缓了干湿循环与温度应力导致的风化劣化进程。这些研究成果为生态护坡技术从定性化经验设计向量化科学设计转型提供了理论支撑,推动了边坡工程与生态修复技术的深度融合。

5.2. 边坡工程加固处理方法

斜坡内部加强措施包括土钉、土锚、岩石锚固、锚索(有或无预应力)、微型桩、灌浆、格构锚固结构、水泥桩、加筋土等等。土钉、土锚主要用于基坑开挖边坡支护等临时性结构,其锚固力有限,主要靠整体性和柔韧性来对边坡进行加固,近20年来,土钉土锚技术有了很大的发展。土钉支护技术的理论研究与工程实践近年来取得系统性突破,形成了多维度技术体系。在作用机制层面,曾宪明、林皋等[57][58]基于多元坐标系分析揭示了土钉支护在软土边坡中的协同工作机理,阐明其融合土钉墙与锚固结构优势的复合加固特性;试验研究方面,曾宪明等[59]通过原型与模型对比试验验证了土钉支护的抗动载性能,

对比解析了香港与重庆地区差异化设计体系,陈世勇等[60]总结出风化岩边坡土钉加固关键技术,娄国充团队[61][62]基于软岩高边坡监测数据提出最危险滑裂面判据。此外,Serrano等[63]和 Sagasetta等[64]对抗拔力模型的深化研究为锚固参数精细化设计提供了理论支撑。朱宝龙等[65]则通过锚索抗拔试验构建了硬岩与类土质边坡的锚固参数体系,发现硬岩地层仅需2~4 m锚固深度即可提供1000 kN锚固力,提出20%~25%超张拉量优化方案并建立荷载-位移曲线模型。

岩石锚杆能提供较大的锚固力,当锚杆提供的锚固力达不到要求时,可以采用锚索甚至锚梁结构,同时可以施加一定的预应力以提供锚固力,成为滑坡治理中的一种常用措施。在滑坡治理工程中,预应力锚索与锚梁结构的应用已成为提升岩土体稳定性的重要手段。研究表明,当传统锚杆提供的锚固力不足时,采用预应力锚索可显著增强抗滑能力,其加固机制通过群锚效应与应力场调整实现[65][66]。例如,李亦明等[67]通过索预应力锚索成功加固清江隔河岩水利枢纽高陡边坡,验证了锚索对复杂地质条件的适应性;朱杰兵等[68]针对三峡船闸边坡的研究进一步揭示了锚索对周边岩体力学性能的改善作用。理论层面,庄心善等[69]基于能量功率理论提出的安全系数计算模型,为锚固设计提供了新的评价维度,而张发明等[70]通过参数优化方法系统解决了锚固间距、荷载分配等关键技术问题。施工实践中,杨杰[71]强调压力分散型锚索的工艺控制对加固效果的关键影响,张电吉等[72]则通过三峡工程监测数据揭示了锚固预应力演化的三阶段特征及其与岩体变形的动态耦合关系[73]。值得注意的是,孙学毅[74]提出的“岩壳”群锚效应和锚索传力深度理论,为预应力技术的精细化应用提供了理论支撑。近年来,动态监测分析[75][76]与新型结构创新,已成为滑坡治理中兼具理论深度与工程实效的关键技术体系[77][78]。

孙少锐、吴继敏等[79]推导了树根桩加固边坡后树根桩与土均质化复合“土体”的本构模型,研究了树根桩应用于边坡加固后的应力场、位移场的变化及边坡的稳定性情况,指出复合本构模型评价树根桩加固边坡的稳定性是完全可行的;吴顺川、高永涛等[80]对高陡路堑边坡提出以微型抗滑桩代替传统抗滑桩、滑面及滑体压力注浆改性的主动加固方式,设计了预应力锚杆、微型抗滑桩、挡土墙、挂网喷射混凝土及中高压注浆的综合处治方案;冯君、周德培等[81]根据微型桩的结构布置形式,将加固顺层岩质边坡的微型桩体系分为3种类型,并将该模型成功应用于渝怀铁路顺层岩质边坡加固中。

学者们针对锚索地梁及框架结构在边坡加固中的力学特性与设计方法开展了系统性探索。李德芳等[82]基于Winkler假定构建了锚索地梁的力学模型,为后续研究奠定理论基础;唐树名等[83]则创新性地提出混合式锚固格构梁设计方法,建立边坡类别与锚间距的关联机制。在结构受力分析方面,肖世国等[84]强调需区分张拉阶段与工作阶段的地基反力差异,刘小丽等[85]通过杆系有限元构建框架地梁的Winkler地基模型,而石广斌等[86]综合运用极限平衡法与接触非线性有限元实现边坡治理方案的优化。针对特殊地质条件,吴礼舟等[87]对比Winkler地基梁与半无限弹性体理论,揭示膨胀土边坡框架梁内力分布规律。在工程实践层面,此外,李忠等[88]开发的稳定性计算软件与吕庆等[89]-[91]关于破碎岩质边坡锚索间距的定量研究,为工程设计参数选取提供了重要依据。这些成果表明,边坡加固需综合考虑地质条件、结构受力特征及施工工艺,通过多方法融合实现支护体系的科学设计。

加筋土是在土体中埋入抗拉材料以改善土体的总体强度,稳定斜坡、支挡开挖边坡都可用加筋土挡墙,较传统挡墙有承受大变形、填料范围广、易于修建、抗地震作用、造价低廉等优点,加筋土在高填路堤边坡上应用非常广泛。杨庆、季大雪、栾茂田等[92][93]通过室内小比尺模型试验,模拟了两种边坡坡比、两种格栅以及3种加筋层数共计10种边坡结构在坡顶荷载作用下边坡和土工格栅的变形规律和力学特征,指出土工格栅埋在土体内部的受力变形规律不是沿格栅全长均匀分布,而是越靠近路堤边坡的中心,格栅的变形量越大,而在靠近坡角处,格栅的应变越小,土工格栅的抗拉能力没有得到充分发挥,加筋边坡破坏时其圆弧滑动面的位置比不加筋边坡的滑动面更靠近堤底中心并向地基的深部发展。

6. 结语

综上所述,对于边坡稳定性分析多年来取得了许多研究成果,传统方法得到了不断完善,新理论新方法得到应用。

(1) 现行边坡稳定性分析方法很多,工程中常用的大多属于极限平衡法。但将滑体视为刚体,边界条件也过于简化,其结果往往误差较大。

(2) 数值模拟在解决边坡工程问题时比其它方法更具有灵活性和更好的适应性,成为边坡工程中比较有效的分析手段,而且越来越多地应用于边坡稳定及变形问题的分析中。但是由于岩土工程问题的复杂性,使边坡工程的数值分析还有许多工作要做。

(3) 由于边坡工程的复杂性和影响因素的多样性,因此任何单一的理论和方法都不能较好的解决具体问题,在实际工程中,应根据边坡工程的具体特点,同时利用多种分析方法进行综合分析验证,得到更加客观、可靠、合理的评价结果。

(4) 多种支护措施的综合应用或优化组合具有广阔的应用前景,在实际工程设计中如何优化组合值得深入研究,支护结构的选型、空间布置与全寿命可靠性分析,给业主具有明确的支护结构安全、经济、性能等指标将是边坡支护设计发展的一个方向。

基金项目

华北水利水电大学第十五届研究生创新能力提升工程项目(NCWUYC-202315073)。

参考文献

- [1] 家俊辉. 国内外重特大山体滑坡灾害盘点[J]. 中国减灾, 2017(13): 32-35.
- [2] 丁宇. 中国山地城镇化的发展路径研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [3] 邹靖. 某地区滑坡地质灾害危险性评估研究[J]. 福建建材, 2022(1): 68-70+86.
- [4] 谭龙, 陈冠, 曾润强, 等. 人工神经网络在滑坡敏感性评价中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(1): 15-20.
- [5] 王恭先. 滑坡防治中的关键技术及其处理方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 20-29.
- [6] 王荣华. 某深基坑工程地下水管涌原因分析与处理[J]. 山西建筑, 2014, 40(33): 60-62.
- [7] 刘新荣, 姜德义, 余海龙. 水对岩石力学特性影响的研究[J]. 化工矿物与加工, 2000, 29(5): 17-20.
- [8] 何爽爽, 汪君, 王会军. 滑坡泥石流大尺度统计预报模型的实时检验[J]. 大气科学学报, 2019, 42(1): 78-92.
- [9] 杜忠原, 葛忻声, 仝飞. 不同降雨条件下高边坡的稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(30): 13039-13045.
- [10] 王来贵, 刘贺, 何峰. 地震过程中斜坡滑动破坏实验分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, 21(4): 48-51.
- [11] 廖继彪, 孙乐瑞, 赵碧岑. 边坡不稳定性因素及防护措施综述[J]. 砖瓦, 2021(2): 71+73.
- [12] 汪益敏, 陈辉. 路基边坡问题研究现状[J]. 中南公路工程, 2004, 29(2): 51-53+57.
- [13] Raghuvanshi, T.K. (2019) Plane Failure in Rock Slopes—A Review on Stability Analysis Techniques. *Journal of King Saud University-Science*, **31**, 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2017.06.004>
- [14] 王森, 陆志宇, 朱新平. 露天矿边坡稳定性评价的定性分析应用[J]. 矿业工程, 2018, 16(1): 12-16.
- [15] 杨忠平, 刘树林, 刘永权. 反复微震作用下顺层及反倾岩质边坡的动力稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1277-1286.
- [16] 李涛. 降雨对土质边坡稳定性影响的研究分析[J]. 水科学与工程技术, 2021(4): 78-81.
- [17] 郭海强, 王占盛, 李安洪, 等. 基于瑞典条分法的铁路边坡极限状态设计研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(1): 23-28.
- [18] Ji, J., Zhang, W., Zhang, F., Gao, Y. and Lü, Q. (2020) Reliability Analysis on Permanent Displacement of Earth Slopes Using the Simplified Bishop Method. *Computers and Geotechnics*, **117**, Article 103286. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103286>

- [19] 曹亮. 简布条分法与 Geo-Studio 在分析滑坡稳定性的应用[J]. 冶金管理, 2021(1): 26-27.
- [20] 削丞民. 用摩根斯坦-普赖斯法分析滑坡体的稳定性[J]. 工程勘察, 1989, 17(1): 16-20.
- [21] 闫丽雯. 基于瑞典条分法和 Bishop 法的广州市白云山某边坡地质灾害危险性分析[J]. 中国金属通报, 2019(12): 106-107.
- [22] 侯波, 姜伙军. 基于 FLAC3D 数值模拟法的毛坞边坡稳定性分析[J]. 江西建材, 2021(7): 76-78.
- [23] 睦敏磊, 郝青苗, 蒋居津, 等. FLAC3D 在官庄滑坡稳定性分析的应用[J]. 山西建筑, 2022, 48(1): 97-99.
- [24] 秦凡, 陈红杰. 基于 GEO-Slope 和 FLAC-2D 的矿山边坡稳定性分析[C]//北京力学学会. 北京力学学会第二十五届学术年会会议论文集. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019: 689-690.
- [25] Liu, Y., Nie, L., Liu, Z., et al. (2021) Discussion on Strength Reduction Method of Finite Element Method for Slope Stability. *Geotechnical Foundation*, **35**, 380-384.
- [26] 王丽俊. 边坡稳定性分析的有限元法与极限平衡法的结合[J]. 世界有色金属, 2021(19): 170-171.
- [27] 张丽美, 郑宏, 聂治豹. 边坡安全系数计算的边界元法[C]//中冶建筑研究总院有限公司. 土木工程新材料、新技术及其工程应用交流会论文集(下册), 北京: 北京工业大学建筑工程学院, 2019: 934-939.
- [28] 林思田. 简布条分法和毕肖普法的改进及在实际中的应用[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2017.
- [29] Zhou, C., Long, X. and Hu, G. (2021) Simulation of Failure and Stability Process of High and Steep Rockfill Slope Based on Discrete Element Method. *Advances in Water Resources and Hydropower Science and Technology*, **41**, 92-98.
- [30] 蒋明镜, 江华利, 廖优斌, 等. 不同形式节理的岩质边坡失稳演化离散元分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(2): 167-174.
- [31] 刘子金, 黄少平, 杨文丰, 等. 基于 3DEC 的面板坝坝肩岩质边坡稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(S2): 966-977.
- [32] 刘蕾, 陈亮, 崔振华, 等. 逆层岩质边坡地震动力破坏过程 FLAC/PFC-(2D)耦合数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1257-1262.
- [33] 周东升, 杨凤芸, 武帅萌. 边坡稳定性分析方法研究现状与展望[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(7): 28-30+34.
- [34] 刘辉, 郑俊杰, 章荣军. 考虑不排水抗剪强度空间变异性的黏土边坡系统失效概率分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(6): 1529-1539.
- [35] 邱天. 边坡稳定的不确定性研究现状与展望[J]. 山西建筑, 2006, 32(4): 114-115.
- [36] Wang, R., Liu, Q. and Yuan, W. (2018) Fuzzy Comprehensive Evaluation of Stability Analysis of Rock Slopes. *Engineering Construction*, **50**, 57-62.
- [37] 陈新民, 罗国煜. 基于经验的边坡稳定性灰色系统分析与评价[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(5): 638-641.
- [38] 王恭先. 滑坡防治工程措施的国内外现状[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1998(1): 2-10.
- [39] Zhang, Z. (2000) The Present Situation and Development Prospect of Landslide Control Engineering. *Geological Hazards and Environmental Protection*, **11**, 89-97.
- [40] Wang, G. (2005) Key Techniques and Treatment Methods in Landslide Control. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **24**, 3818-3827.
- [41] 贺建清, 张家生, 梅松华. 弹性抗滑桩设计中几个问题的探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497-502.
- [42] Dai, Z. (2002) Study on the Distribution Law of Landslide Thrust and Anti-Slide Body Resistance of Anti-Slide Pile. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **21**, 517-521.
- [43] Dai, Z. and Peng, Z. (2003) Study on Finite Difference Method for Internal Force Calculation of Prestressed Anchoring Anti-Slide Pile. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **22**, 407-413.
- [44] Shen, Q., Chen, C., Wang, M. and Liu, X. (2005) Monitoring and Analysis of Reinforcement Effect of Anti-Slide Pile on Slope. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **24**, 934-938.
- [45] Song, C., Zhou, D. and Xiao, S. (2005) Internal Force Calculation of Embedded Anti-Slide Pile in High Rock Slope. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **24**, 105-109.
- [46] Zhou, D. and Wang, J. (2002) A Calculation Method for the Internal Force of Prestressed Anchor Pile. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **21**, 247-250.
- [47] 刘小丽, 周德培, 杨涛. 加固土坡的抗滑桩内力计算新方法[J]. 工业建筑, 2003, 33(4): 45-48.
- [48] 黄昌富, 田书广, 吴顺川, 等. 基于突变理论和广义 H-B 强度准则的采空区顶板稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 330-337.

- [49] 杨志法, 张路青, 祝介旺. 四项边坡加固新技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3828-3834.
- [50] 贺咏梅, 彭伟, 阳友奎. 边坡柔性防护系统的典型工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 323-328.
- [51] 阳友奎. 边坡柔性加固系统设计计算原理与方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 217-225.
- [52] 杨涛, 周德培, 雷承第, 等. 柔性防护边坡的稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 294-298.
- [53] 徐中华, 王建华, 等. 活树桩固坡对边坡稳定性影响的数值分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(Z2): 275-279.
- [54] Zhang, J. and Zhou, D. (2006) Research on Ecological Protection Mechanism of Red Bed Mudstone Slope. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **25**, 250-256.
- [55] Zhou, L., Zhou, D. and Cheng, Q. (2005) Research on Relevant Parameters of Vegetation Protection on Red Bed Soft Rock Slope. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **24**, 1407-1410.
- [56] Zhang, J., Zhou, D. and Li, S. (2001) Experimental Study on Ecological Planting Foundation of Rock Slope. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **20**, 239-242.
- [57] 阴可, 张永兴. 港渝两地边坡工程中土钉技术的对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 705-711.
- [58] 曾宪明, 林皋, 易平, 等. 土钉支护软土边坡的加固机理实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 429-433.
- [59] 曾宪明, 杜云鹤, 李世明. 土钉支护抗动载原型与模型对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1892-1897.
- [60] 陈世勇, 王元汉. 土钉支护技术在风化岩工程边坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(11): 1681-1684.
- [61] Lou, G. and Zhou, D. (2004) Monitoring Analysis and Optimization Design of Soil Nail Support for Soft Rock High Slopes. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **23**, 2734-2738.
- [62] 郑志辉, 贺若兰, 徐勋长, 等. 复合土钉支护厚杂填土边坡现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 898-904.
- [63] Serrano, A. and Olalla, C. (1999) Tensile Resistance of Rock Anchors. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **36**, 449-474. [https://doi.org/10.1016/s0148-9062\(99\)00021-2](https://doi.org/10.1016/s0148-9062(99)00021-2)
- [64] Sagaseta, C., Sánchez, J.M. and Cañizal, J. (2001) A General Analytical Solution for the Required Anchor Force in Rock Slopes with Toppling Failure. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **38**, 421-435. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(01\)00011-9](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(01)00011-9)
- [65] Zhu, B., Yang, M., Hu, H. and Chen, Q. (2004) Experimental Study on Anchoring Characteristics of Soil Like Slopes. *Geotechnical Mechanics*, **25**, 1923-1927.
- [66] 李宁, 韩焜, 陈飞熊. 预应力群锚加固机制数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(5): 60-66.
- [67] 李亦明. MS-20 型锚索测力计在清江隔河岩升船机边坡锚索加固中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(z1): 1823-1826.
- [68] 朱杰兵, 韩军, 程良奎, 等. 三峡永久船闸预应力锚索加固对周边岩体力学性状影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 853-857.
- [69] 庄心善, 胡其志, 何世秀. 锚杆加固岩体边坡设计法分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 1013-1015.
- [70] Zhang, I., Liu, N., Zhao, W. and Chen, Z. (2002) Optimization Design Method for Prestressed Anchor Cable Reinforcement of Rock Slopes. *Geotechnical mechanics*, **23**, 187-190.
- [71] 杨杰. 高速公路路堑边坡加固预应力锚索施工技术与质量控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(z2): 2759-2764.
- [72] 张电吉, 汤平, 白世伟. 节理裂隙岩质边坡预应力锚索锚固监测与机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1276-1280.
- [73] Yuan, P., Wu, M., Lu, Y. and Zhang, C. (2003) Monitoring of Prestressed Anchor Cables on the High Slope of the Yangtze River Three Gorges Permanent Ship Lock. *Geotechnical Mechanics*, **24**, 198-201.
- [74] Sun, X. (2004) Discussion on the Mechanism of Slope Reinforcement. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **23**, 2818-2823.
- [75] 刘祚秋, 周翠英, 尚伟, 等. 东深供水改造工程 BIII2 边坡预应力锚索加固优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 1020-1024.
- [76] 朱晗迺, 孙红月, 尚岳全, 等. 边坡加固锚索预应力变化规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2756-2760.
- [77] 李宁, 张平, 李国玉. 岩质边坡预应力锚固的设计原则与方法探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(17): 2972-

- 2976.
- [78] Zhao, J., Gao, Q. and Li, L. (2005) Application Analysis of Prestressed Anchor Cable Reinforcement Engineering for Layered Rock Slopes. *Geotechnical Mechanics*, **26**, 1338-1341.
- [79] Sun, S., Wu, J., Wei, J. and Hou, W. (2003) Stability Analysis and Evaluation of Slope Reinforcement with Tree Root Piles. *Geotechnical Mechanics*, **24**, 776-780.
- [80] 吴顺川, 高永涛, 金爱兵. 失稳高陡路堑边坡桩锚加固方案分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3954-3958.
- [81] 冯君, 周德培, 江南, 等. 微型桩体系加固顺层岩质边坡的内力计算模式[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 284-288.
- [82] Li, D., Zhang, Y. and Chen, C. (2000) Calculation of Internal Force of Prestressed Anchor Cable Ground Beam in Slope Reinforcement. *Geotechnical Mechanics*, **21**, 170-172.
- [83] 唐树名, 吕常新, 邓安福. 混合式锚固结构在高速公路路堑边坡加固中的应用研究[J]. 岩土力学, 2002, 21(5): 702-704.
- [84] 肖世国, 周德培. 岩石高边坡预应力锚索地梁的一种内力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 250-253.
- [85] 刘小丽, 张占民, 邓建辉. 边坡加固中预应力锚索框架地梁的杆系有限元分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1027-1031.
- [86] Shi, G., Yang, J., An, S. and Li, N. (2004) Mechanism Analysis and Reinforcement Design of Steep and High Slope Collapse at Shiquan Hydropower Station. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **23**, 1186-1192.
- [87] 吴礼舟, 黄润秋. 加固膨胀土路堑边坡中框架梁的内力计算[J]. 岩土力学, 2005, 26(7): 1113-1117.
- [88] Li, Z. and Zhu, Y. (2005) Stability Calculation Method and Application of Frame Prestressed Anchor Rod Slope Support Structure. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **24**, 3922-3926.
- [89] 朱宝龙, 杨明, 胡厚田, 陈强. 土质边坡加固中预应力锚索框架内力分布的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 697-702.
- [90] Yang, Y. and Lv, D. (2006) Research on Strengthening and Treating High Carbon Shale Slopes on Freeways. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, **25**, 392-398.
- [91] 吕庆, 孙红月, 尚岳全, 朱晗逐. 预应力锚索框格梁体系加固破碎岩质边坡合理间距研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 136-140.
- [92] 杨庆, 季大雪, 栾茂田, 张克. 土工格栅加筋路堤边坡结构性能模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1243-1246.
- [93] Zhao, F., Du, D. and Hu, G. (1999) Deformation and Failure of Planar Rotating Slopes. *Disaster Science*, **14**, 1-5.