

# Research on stability analysis and reinforcement technology in geotechnical engineering design

Shuangjiang Yun

Shaanxi Mining Research Institute Co., Ltd., Xianyang, Shaanxi, 712000, China

## Abstract

This paper focuses on the geotechnical engineering design, and explores the stability analysis and reinforcement technology in depth. The principle, application and limitation of qualitative and quantitative stability analysis methods, including natural history analysis method and limit equilibrium method, are described in detail. At the same time, the principles, materials, equipment, construction technology and application scenarios of grouting, soil nailing and other strengthening technologies are introduced. Through the practical cases of large-scale open-pit mine slope and urban high-rise building foundation, the advantages of the combined application of stability analysis and reinforcement technology are demonstrated, and the technical, cost and environmental challenges faced in the combined application process are also analyzed. The research shows that the effective combination of the two is of great significance to ensure the safety of geotechnical engineering and improve economic benefits, and provides an important reference for geotechnical engineering design.

## Keywords

geotechnical engineering; Stability; Reinforcement technique

# 岩土工程设计中的稳定性分析与加固技术研究

贡双江

陕西地矿研究院有限公司, 中国·陕西 咸阳 712000

## 摘要

本文聚焦岩土工程设计, 深入探究稳定性分析与加固技术。详细阐述了定性和定量稳定性分析方法, 包括自然历史分析法、极限平衡法等多种方法的原理、应用及局限性。同时介绍了注浆、土钉支护等多种加固技术的原理、材料、设备、施工工艺及适用场景。通过大型露天矿山边坡、城市高层建筑地基等实际案例, 展示了稳定性分析与加固技术结合应用的优势, 也分析了结合应用过程中面临的技术、成本和环境等方面的挑战。研究表明, 二者的有效结合对保障岩土工程安全、提升经济效益意义重大, 为岩土工程设计提供了重要参考。

## 关键词

岩土工程; 稳定性; 加固技术

## 1 引言

在现代基础设施建设中, 岩土工程作为关键组成部分, 广泛涉及建筑、交通、能源等众多领域。从高耸的摩天大楼到深埋地下的地铁隧道, 从大型水利枢纽到露天矿山开采, 岩土工程的稳定性直接关乎工程的安全与可持续运行。然而, 岩土体的性质极为复杂, 受到地质构造、地层岩性、水文地质条件以及人类工程活动等多种因素的综合影响。这使得准确评估岩土工程的稳定性并采取有效的加固措施成为一项极具挑战性的任务。若稳定性分析不准确或加固技术应用不当, 可能引发诸如滑坡、地基沉降、基坑坍塌等严重的工程事故, 不仅会造成巨大的经济损失, 还可能危及人们的

生命安全。因此, 本文将深入研究岩土工程稳定性分析方法与加固技术。

## 2 岩土工程稳定性分析方法

### 2.1 定性分析方法

定性分析方法通过工程地质勘察, 对影响边坡稳定性的主要因素、变形破坏方式及力学机制等展开分析, 阐述易变性地质体成因与演化史, 从而对边坡稳定性及其发展趋势给出定性说明。其优势在于能综合考量多种因素, 快速评价边坡状况; 不足是缺乏具体数值分析, 对实际工程而言不够全面精确, 常需与定量分析结合。定性分析方法包含自然历史分析法、工程类比法和图解法等。自然历史分析法, 依据边坡发育的地质环境、变形破坏迹象及影响因素等, 追溯演变全过程, 预测稳定性。像三峡库区某边坡, 通过研究其地质构造、地层岩性、地形地貌和水文地质等, 结合变形破坏

【作者简介】贡双江(1986-), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 工程师, 从事地质工程研究。

迹象,判断其不稳定且可能发生大规模滑坡,后经数值模拟验证,采取加固措施提高稳定性。工程类比法基于相似理论,对比已知与待建工程地质条件预测未知情况。例如某城市新建高层建筑,场地地质与附近已建成建筑相似,借鉴其桩筏基础方案,结合自身特点确定基础形式,施工监测表明效果良好。应用时需注意类比对象在地质条件、工程类型等方面相似性系数达0.8以上,且数据完整。图解法利用图形分析边坡稳定性,如赤平极射投影法。以某岩质边坡为例,通过测量结构面产状绘制投影图,直观判断稳定性,为加固设计提供参考。但该方法适用于简单边坡,复杂地质条件下结果不够准确,且多为定性或半定量分析,常需与其他方法结合。

## 2.2 定量分析方法

定量分析方法借助力学原理分析边坡稳定性,当前多为半定量分析。其分为确定性与不确定性分析方法。确定性分析含极限平衡分析法和数值分析方法;不确定性分析有可靠度分析、人工神经网络分析等方法。极限平衡法是常用解析法,依滑体力学平衡原理,按不同假设又细分多种,如Fellenius法、Bishop法等。以瑞典圆弧法(Fellenius法)为例,假定滑动面为圆弧形,分土条为刚体,不考虑土条两侧力,仅满足整体力矩平衡。其计算公式为  $F_s = \sum (c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \phi_i) / \sum W_i \sin \alpha_i$ ,概念清晰、应用广泛,但简化条件多,仅适用于  $\phi = 0$  情况,稳定系数偏低,也无法准确反映实际受力。数值分析方法用计算机仿真,像有限元法、有限差分法、离散元法等。有限元划分单元构建模型求解微分方程,能模拟岩土体应力应变,如某大型边坡工程考虑多种因素用其分析;有限差分分割网格分析状态参数,常用于渗流等问题;离散元模拟颗粒作用,适用于节理岩体等不连续介质,如节理岩体边坡开挖分析。概率统计法将工程参数当随机变量,通过概率计算稳定性,如蒙特卡洛法大量抽样模拟,能考虑参数不确定性,但计算耗时;可靠性指标法建立极限状态方程求可靠性指标  $\beta$  得出失效概率,为决策提供直观依据,不过对数据要求高。

## 3 岩土工程加固技术

### 3.1 注浆加固技术

注浆加固技术借助气压、液压或电化学原理,向岩土体注入浆液。浆液以填充、渗透、挤密等方式,排除土颗粒或岩石裂隙中的水分和空气,经物理化学反应改善岩土体物理力学性质,提升强度与稳定性。填充作用下,浆液填充孔隙等空间,如砂性土地基中提高密实度和承载能力;胶结作用能粘结松散颗粒,像破碎岩石边坡经注浆提高稳定性;加筋作用使固结体类似加筋,增强土体抗剪;挤密作用则压实松散土体。常见注浆材料有水泥浆和化学浆液。水泥浆成本低、强度高、耐久性好,广泛用于地基加固,但颗粒大,对细微孔隙可注性差。化学浆液可注性佳,能注入细微处,像水玻璃用于止水堵漏,高分子浆材用于高要求工程,不过成

本高且部分有毒、污染环境。注浆设备含注浆泵、搅拌机、钻孔机等。注浆泵稳定输送浆液,柱塞泵、螺杆泵常见;搅拌机均匀混合材料;钻孔机依岩土性质和要求选择,如回转式、冲击式。还有止浆塞、混合器等辅助设备。施工工艺包括钻孔,依设计确定位置、间距、深度,控制垂直度和孔<sup>[1]</sup>径;安设注浆管,确保密封、畅通;注浆时严控压力、量和速度,密切观察,及时处理问题。如某粉质黏土地基加固工程,用水泥浆,回转式钻孔机钻孔,安设注浆管后,按特定压力、量和速度注浆,检测显示地基承载力显著提升,证明注浆加固技术效果良好,但施工需严格把控各环节质量。

### 3.2 土钉支护技术

土钉支护技术是岩土工程常用加固法。原理是在土体钻孔,植入钢筋或钢管等土钉并注浆,使土钉与土体紧密结合,形成类似重力式挡墙的挡土结构,由土钉群、被加固土体和喷射混凝土面层构成。土体抗剪抗拉弱但有整体性,传统护坡靠支挡,土钉墙则主动增强土体稳定性,土钉起加筋作用,喷射混凝土面层保护土体、连接土钉。设计要点方面,土钉长度依土体性质、边坡高度、荷载等确定,如软土地基基坑支护,土钉长可达基坑深度0.8倍;直径常选20~32mm,依工程调整;间距1~2m,特殊情况可改变。施工流程上,工作面分层开挖,每层高度依土体自立性定,砂性土0.5~2.0m,黏性土可增大,纵向长一般10m。开挖后尽快进行钢筋网喷射混凝土面层施工,临时支护一层厚50~150mm,永久支护两到三层厚100~300mm,强度等级不低于C15。安设土钉可借鉴锚杆经验,注浆式钻孔直径70~150mm,常用钢筋,做好防腐。永久工程边坡表面需美观,设排水措施。某城市8m深基坑,周边环境复杂,采用土钉支护。据粉质黏土、低水位地质条件,确定土钉长度6m、直径25mm、间距1.5m等参数。施工严格按流程,开挖后及时施工土钉和面层,监测显示基坑边坡位移、沉降在允许范围,土钉拉力正常,基坑稳定,表明土钉支护技术施工方便、成本低且效果良好,为类似工程提供参考。

### 3.3 其他加固技术

锚杆静压桩加固技术巧妙结合锚杆与压桩,利用建筑自重为反力。先在基础开凿或预留压桩孔,植入锚杆,安装压桩架,借千斤顶将桩逐段压入地基,达设计深度后与基础牢固连接,提升地基承载、控制沉降。某住宅楼因年代久、功能需求改变且周边场地复杂,采用此技术。施工时先勘察测量确定压桩孔位置数量,用小型设备开凿植入锚杆,安装压桩架与千斤顶压桩,严控速度、压力等,桩身检测合格后与基础连接。经加固,地基承载提高,沉降控制,裂缝修复,居民安全有保障,且施工对环境与居民生活干扰小<sup>[2]</sup>。不过该技术受地质条件限制大,软土、岩溶地区需特殊处理,且对施工技术要求高。地下连续墙加固技术通过挖掘深槽、浇筑混凝土成墙的方法。利用专门设备在泥浆护壁下分段开挖沟槽,放置钢筋笼并浇筑,形成连续墙体,能承受侧压力与

防水。某市中心地下停车场建设,因周边建筑密集、地质复杂、水位高,采用此技术。施工前先地质勘察,用液压抓斗成槽机作业,泥浆护壁,成槽后吊放钢筋笼浇筑混凝土,严控施工参数并实时监测垂直度。最终基坑有效支护,无明显变形坍塌,防水效果佳。但此技术施工成本高,需大型设备与专业队伍,泥浆处理要求高,拆除也较困难。

## 4 稳定性分析与加固技术的结合应用

### 4.1 案例分析

某大型露天矿山边坡高约80m,地处山区,地质复杂,砂岩与页岩互层,节理裂隙发育。开采改变原始应力,有失稳风险。前期运用极限平衡法(瑞典圆弧法、Bishop法)和有限元法分析,考虑自重、地下水、地震等因素,结果显示当前工况下边坡安全系数低,暴雨时稳定性更差。基于分析,采用预应力锚索加固。依据地质和分析结果,确定锚索长15-20m、间距 $3\text{m} \times 3\text{m}$ 、倾角 $15^\circ - 25^\circ$ 、调整预应力。施工按要求规范操作,钻孔确保垂直度与深度,安装锚索注浆,分级施加预应力。设置监测点,加固后边坡位移减小,锚索拉力正常,运行监测边坡稳定,体现稳定性分析与加固结合的重要性。某城市高层建筑,场地为软土地基,承载力低、压缩性高。建筑高100m,采用框架-核心筒结构,对地基要求高。工程前经勘察与土工试验获取参数,用有限元法分析沉降和稳定性,考虑建筑荷载、地土特性及地下水作用,结果表明天然地基沉降超允许范围,稳定性差。为此采用CFG桩复合地基加固,该地基由水泥等材料桩体与桩间土构成,能提升承载、减小沉降。设计依荷载、土质和分析确定桩径500mm、桩长15m、桩间距1.5m,桩顶设300mm褥垫层。施工严控质量,长螺旋钻孔管内泵压成桩确保质量,铺设褥垫层保证厚度压实度。施工及运营期监测显示,加固后地基沉降减小,稳定性良好,满足使用要求,体现复杂地基工程中二者结合能有效解决问题。

### 4.2 结合应用的优势与挑战

稳定性分析与加固技术结合在岩土工程优势显著。准确的稳定性分析为加固提供科学依据,像某边坡工程,借极限平衡法和有限元法明确潜在滑动面与下滑力,据此选用预应力锚索加固,合理设计参数,提升稳定性。反之,无精准分析会使加固盲目,危及工程安全。加固技术实施保障稳定

性分析结果落地。以某地基加固工程为例,CFG桩复合地基加固使地基土与桩体协同工作,提高承载、减小沉降,若不施工,稳定性问题依旧。二者结合还能提升经济效益,如某基坑支护工程,经分析选土钉支护并优化参数,既保安全又降成本。不过,结合应用面临挑战。技术上,稳定性分析方法有假设简化,岩土体参数难精确定,不同分析结果有差异,影响加固技术选择。加固技术适配性、设计施工工艺优化也待研究。成本方面,稳定性分析前期勘察等工作增加成本,加固实施成本亦高,像大型边坡加固采用先进技术材料,虽效果好但费用大增。还需考虑环境影响,如噪声、粉尘、材料污染等,需采取措施降低负面影响。

## 5 结语

岩土工程稳定性分析与加固技术的研究在保障工程安全、提高经济效益方面具有不可替代的作用。通过多种稳定性分析方法的综合运用,能够较为准确地评估岩土体的稳定性状态,为加固技术的选择和设计提供科学依据。而多样化的加固技术,针对不同的地质条件和工程需求,为解决岩土工程稳定性问题提供了丰富的手段。在实际工程应用中,稳定性分析与加固技术的结合已取得了显著成效,多个案例证明了这种结合应用的可行性和有效性。然而,我们也必须认识到,目前二者的结合仍面临诸多挑战。未来,随着科技的不断进步,新的理论、方法和材料将不断涌现<sup>[1]</sup>。一方面,应持续探索更精确的稳定性分析方法,减少现有方法中的假设和简化,提高分析结果的准确性;另一方面,要致力于研发更高效、环保且经济的加固技术,拓展其适用范围。同时,加强对二者结合应用的系统性研究,形成更为完善的理论和技术体系,从而更好地服务于各类岩土工程,推动岩土工程领域的持续发展,为现代社会的基础设施建设提供更坚实的保障。

### 参考文献

- [1] 贾二红.岩土工程施工中的边坡稳定性分析与处理技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2024(12):050-053.
- [2] 张立浩.岩土工程中的边坡加固工程施工技术研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(1):127-130.
- [3] 杨彪,熊广德.岩土工程中边坡稳定性与加固技术研究[J].中国科技期刊数据库 工业A,2024(10):0140-0143.