

边坡加固：岩土土木工程稳定性优化实践

周晋毅

广东省有色工业建筑质量检测站有限公司 广东 广州 510725

【摘要】：岩土边坡在复杂地质构造与多源荷载共同作用下易产生变形累积与局部失稳。针对结构面发育、渗流软化及应力分布不均等问题，构建锚固支护、喷射混凝土与排水系统协同优化体系，并结合数值模拟与监测数据开展参数匹配分析。通过优化锚杆布设、喷层刚度配置及孔隙水压力控制，实现受力路径重构与渗流通道调节。结果表明，边坡变形幅度明显降低，应力集中得到有效分散，整体稳定性与安全储备显著提升，结构可靠性增强。

【关键词】：边坡加固；岩土工程；稳定性优化；锚固支护；排水控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.035

引言

岩土工程建设过程中边坡结构长期处于复杂地质环境及外部荷载共同作用状态，局部应力集中与结构弱面发育现象频繁出现。现有加固体系多依赖单一支护模式，整体受力协调性不足，排水体系不完善，导致变形扩展路径难以有效控制。针对不同岩性条件下的结构响应特征，逐步引入锚固体系、喷射混凝土层及土钉支护联合配置，并配合排水通道优化与参数化分析手段，实现受力传递路径重构。边坡稳定性控制水平由此得到改善，结构变形范围逐步收敛，整体安全储备同步提升。

1 岩土边坡失稳演化特征识别体系

1.1 复杂地质结构作用下变形累积规律

岩土边坡在层状、节理化及风化差异显著的地质结构中呈现非均质受力特征，局部刚度差异导致应力重分布路径持续调整。软弱夹层与结构面交错分布时，剪应变在界面处逐步集中并向坡体内部传递，形成渐进式变形累积链条。岩体颗粒结构在长期自重与外界扰动共同作用下发生微裂隙扩展，裂隙网络逐渐连通并改变整体渗透与力学响应模式。不同岩性单元之间变形协调能力不足，使得局部变形无法及时释放并向深部扩展，形成多层次耦合变形体系。结构面倾角与坡面临空条件相互叠加后，加速局部剪切带形成，变形路径呈现阶段性突进特征。

1.2 外部荷载扰动引发的滑移机制分析

外部荷载作用下边坡内部应力状态发生动态重构，附加应力沿潜在滑移面重新分布并诱发剪应力峰值集中。降雨渗透荷载与地表附加荷载叠加时，孔隙水压力上升削弱有效应力，降低抗剪强度参数稳定性[1]。循环荷载作用导致结构面摩擦特性发生渐进退化，滑移界面由局部微滑动逐步演化为整体性滑移带。应力扰动传播过程中存在滞后效应，使深层结构响应呈现非同步特征，局部破坏先行发展后向整体扩展。滑移机制表现为剪切软化与结构面贯通协同演化过程，受力路径不断向弱化区域集中。

1.3 弱面发育条件下破坏路径判定方法

弱面在边坡内部空间分布具有随机性与方向性双重特征，裂隙扩展方向受主应力场控制并逐步形成优势破坏通道。基于结构面几何组合关系，可对潜在贯通路径进行空间约束分析，识别多组节理交汇形成的低阻滑移区域。剪应力场演化过程中，局部峰值区域与弱面空间位置高度耦合，破坏路径沿能量最小释放方向逐步延伸。岩体完整性指数降低时，结构面连接概率显著提升，促使离散裂隙向连续破坏带转化。路径判定过程中需综合考虑应力集中区、渗流软化区及结构面组合关系，使破坏扩展轨迹呈现多维耦合控制特征。

2 多因素约束条件下支护配置优化路径

2.1 岩性差异对加固方案选择影响机制

不同岩性组合条件下边坡力学响应呈现显著差异，硬质岩体与软弱岩层交替分布时，应力传递路径发生明显偏转，导致局部剪切带优先在低强度区域形成。岩体结构致密程度决定锚固体与围岩之间的黏结效率，节理发育密集区域易产生应力集中与锚固失效风险。风化程度较高的岩层在长期荷载作用下强度衰减速度加快，使支护体系受力重心不断下移。针对不同岩性组合，需要在承载能力、变形模量及结构完整性之间建立匹配关系，使支护单元具备分区适配能力。加固材料刚度与岩体变形协调性直接影响整体稳定性，刚柔匹配不足会导致界面滑移加剧，形成新的弱化区。

2.2 应力分布不均条件下结构适配策略

边坡内部应力场在地形起伏与开挖扰动作用下呈现明显非均匀性，高应力区与低应力区交替分布，形成多中心受力结构体系。局部应力集中区域易诱发塑性变形积累，进而推动剪切带向外扩展。结构适配过程中需调整支护单元空间密度与刚度梯度，使高应力区域具备更强约束能力。锚固体系布设需顺应主应力方向变化，通过空间重构实现受力路径分散化。喷射层厚度与强度梯度配置可调节表层应力扩散效率，降低局部峰值应力[2]。结构适配机制强调多层次协同作用，使浅层约束与深层加固形成连续受力体系，避免应力突变引发结构失稳。

2.3 多荷载耦合作用下参数协调方法

边坡在自重应力、降雨渗透力及外部附加荷载共同作用下形成复杂耦合受力环境,各类荷载相互叠加并改变原有应力平衡状态。孔隙水压力变化直接影响有效应力水平,使抗剪参数呈现动态波动特征。循环荷载作用下结构面摩擦系数逐步衰减,导致滑移阻力下降速度加快。参数协调过程中需在锚固长度、锚固密度及支护刚度之间建立动态匹配关系,使各类参数随荷载变化实现同步调整。排水参数与结构参数联动设计能够削弱渗流软化效应,提高整体抗变形能力。多荷载耦合控制强调参数空间的协同优化,使局部受力峰值得到分散释放,从而维持整体结构稳定性边界。

3 锚固与喷射支护协同强化实施方案

3.1 锚杆布设角度与深度优化设计

锚杆空间布设角度直接影响受力传递方向与围岩加固范围,倾角调整可改变轴向拉应力与剪应力分解比例,使锚固力更有效作用于潜在滑移面。深度参数决定锚固体是否穿透关键弱面并进入稳定岩层区域,深浅匹配不足易导致锚固端承载能力不足或材料浪费。多层节理结构条件下,锚杆需跨越多个结构面形成跨层约束体系,使不同岩性单元实现力学联结。锚固密度梯度布置可强化高变形区域约束能力,通过空间分级控制实现受力均衡分配。倾角与坡面主应力方向匹配时,可显著降低剪切滑移倾向,使锚固体形成主动加固效应。深度参数优化结合岩体完整性指数与结构面分布特征,使锚固端嵌固位置避开弱化带并进入高承载岩层,从而提升整体抗拔能力与长期稳定性。

3.2 喷射混凝土厚度与强度匹配控制

喷射混凝土层作为浅表约束结构,其厚度分布直接影响应力扩散路径与表层变形控制能力。厚度不足时局部受力集中难以有效扩散,易产生裂缝贯通与剥离现象;厚度过大则可能导致自重附加应力增加并降低经济合理性。强度等级配置需与围岩变形模量相协调,使刚度差异控制在合理范围内,避免界面应力突变。分区变厚设计可针对高变形区域增强约束能力,在低应力区域保持适度柔性以实现应力缓冲[3]。早期强度发展速度对结构封闭效果具有关键影响,快速凝结特性有助于抑制初期变形扩展。纤维增强与微结构优化可提升抗裂性能,使喷层在复杂受力环境中保持整体连续性。厚度与强度协同调控构建梯度刚度壳体结构,实现浅层应力均化与变形约束双重作用。



图1 喷射混凝土厚度—强度协同控制机理图

3.3 锚喷联合受力传递机制重构方法

锚杆与喷射混凝土形成复合支护体系时,受力传递路径呈现多级耦合特征,荷载由表层喷层向深部锚固结构逐级传递。界面结合质量决定整体协同效率,黏结不足易形成应力中断区域,导致局部失效扩展。受力重构过程中通过刚度连续化设计实现应力平滑过渡,使浅层约束与深层加固形成连续传力链条。锚杆轴向力与喷层环向约束共同作用,使围岩处于三向受压状态,从而提升抗剪强度储备。节点区域强化处理可减少应力集中效应,使荷载分布更加均匀。多尺度耦合分析揭示微裂隙扩展与宏观结构响应之间的关联机制,为受力路径优化提供依据。锚喷协同体系在动态荷载作用下通过能量分散机制降低局部破坏风险,使整体结构呈现更高的稳定冗余度。

4 排水系统重构及应力释放控制路径

4.1 地下水渗流通道疏导设计方法

地下水在边坡内部的迁移路径受岩体孔隙结构与节理网络共同控制,渗流通道呈现多分支与非均质扩散特征。疏导设计需基于渗透系数分区识别,构建主排水通道与辅助导流通道相结合的空间体系,使水流快速汇集并定向排出。高渗透区域优先形成导流主干,低渗透区域通过增强连通性改善水力梯度分布。结构面交汇位置作为渗流集中节点,通过优化排水路径布局降低局部水压累积。多层排水体系设计使浅层与深层渗流分别受控,避免水体在滑移面附近滞留。导流路径与潜在破坏面保持空间错离关系,使水流不沿弱结构面发展,从而削弱渗流对剪切强度的削弱作用。

4.2 边坡孔隙水压力削减控制策略

孔隙水压力在岩土体内部形成附加应力场,对有效应力状态产生直接削弱作用,导致抗剪强度下降。压力削减过程需通过分级泄压结构实现梯度释放,使水体由高压区向低压排泄区逐步迁移。排水孔布设密度与空间分布需与渗流场耦合,使水压峰值区域获得优先释放通道。减压结构通过改变水力坡降路径降低局部水头高度,减少孔隙压力积聚速度[4]。微裂隙扩展区域通过增强排水连通性加快压力平衡过程,抑制软化带形成。动态渗流调节机制能够在降雨或地下水位波动条件下维持压力稳定区间,使有效应力保持在安全范围内,从而提升整体

抗滑稳定性能。

4.3 排水结构对稳定性影响调节机制

排水结构通过改变边坡内部水力场分布，对应力场重构产生直接影响，水分迁移状态与力学响应之间形成强耦合关系。排水效率提升可降低孔隙水压力峰值，使有效应力路径重新分布并增强颗粒间接触力。排水构件空间布置对渗流方向具有引导作用，可削弱沿滑移面的水流集中效应。结构与岩体界面之间的水力交换过程影响局部软化程度，合理控制界面排水能力可延缓剪切带形成。多层排水系统通过分级泄压实现能量释放均衡化，使水力扰动不集中作用于单一破坏带。排水结构与支护体系协同作用时，可形成水力—力学双重约束机制，使边坡稳定状态在复杂环境作用下保持较高的调节能力。

5 边坡稳定性提升效果评估体系构建

5.1 数值模拟条件下变形响应对比分析

数值模拟通过构建岩土体本构关系与边界约束条件，重现边坡在不同荷载与支护条件下的变形演化过程。变形响应分析重点关注位移场分布梯度、剪应变集中区域及塑性区扩展路径，通过多工况对比识别结构敏感参数变化规律。网格离散精度与材料参数选取直接影响模拟结果的可靠性，需要在计算稳定性与精度之间取得平衡。不同支护组合条件下的位移差异反映加固体系对变形控制能力的强弱，局部变形峰值位置变化揭示受力路径调整特征。时间序列分析能够捕捉渐进性破坏发展过程，使变形演化阶段划分更加清晰。模拟结果通过空间分布对比可识别潜在失稳区域，为结构优化提供定量依据。

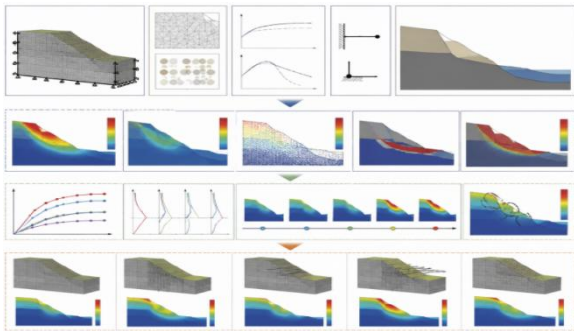


图2 数值模拟边坡变形响应对比分析图

5.2 现场监测数据与模型结果匹配验证

现场监测体系通过位移传感、孔隙水压力监测及应力测试

参考文献：

- [1] 鲁威.边坡加固工程施工技术在岩土工程中的应用[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(30):83-85.
- [2] 马冲.岩土工程中边坡加固工程施工技术分析[J].城市建设理论研究(电子版),2025,(28):122-124.
- [3] 郑长滨.岩土工程中边坡加固的岩土锚固技术及其应用效果[J].大众标准化,2025,(17):140-142.
- [4] 吴雷.岩土工程中边坡加固工程施工关键技术的应用[J].四川建材,2025,51(3):159-161+169.
- [5] 罗玉强.岩土工程中边坡加固工程施工技术应用研究[J].现代工程科技,2024,3(24):70-73.

等多源数据获取边坡真实响应状态。数据序列反映结构在自然环境与施工扰动共同作用下的动态变化特征，具有高时效性与复杂性。模型结果与监测数据之间的匹配程度用于检验参数设定合理性与计算模型适用范围[5]。误差来源主要体现在岩体非均质性简化与边界条件理想化处理差异，通过参数反演方法可对模型进行修正优化。多点监测数据空间插值分析能够还原整体变形场结构，使局部数据具有系统解释能力。动态对比过程中识别响应滞后与幅值偏差特征，有助于完善预测模型的适应能力，使理论计算与实际响应趋于一致。

5.3 安全储备提升与结构可靠性评价机制

安全储备评价基于抗滑力与驱动力之间的比例关系，通过引入多工况荷载组合分析结构极限承载能力变化规律。稳定性系数在不同受力状态下的变化趋势反映结构抗失稳能力的动态裕度。可靠性评价体系结合概率统计方法，对材料参数离散性与外部荷载不确定性进行综合量化分析。失效概率分布用于描述边坡在极端条件下的破坏风险水平，从而构建分级安全控制标准。结构冗余度分析反映支护体系在局部失效情况下的整体承载维持能力。多指标耦合评价模型使安全储备由单一系数判定转向综合性能判定，使边坡稳定性控制具备更强的适应性与精细化特征。

6 结语

边坡稳定性控制体系在多源耦合作用下呈现结构化优化特征，锚固、喷射与排水体系形成多层协同约束链条，应力路径与渗流通道得到同步重构。变形控制机制与水力调节机制相互耦合，使局部失稳扩展受到抑制，整体安全储备逐步增强。多尺度分析与监测验证手段提升结构响应识别精度，数值模拟与现场反馈形成闭环校核机制，稳定性评价体系由单一指标向综合性能体系转变。