

高边坡开挖中预应力锚索锚固力损失补偿与长期监测技术

李长福

文安县水务局

DOI:10.12238/jpm.v6i8.8279

[摘要] 在高边坡开挖工程中，预应力锚索作为控制边坡稳定性的核心技术，其锚固力的长期有效性直接关系到工程安全。然而，受地质条件、施工工艺及环境因素影响，锚固力易发生损失，若未及时补偿，可能引发边坡变形甚至失稳。本文分析高边坡开挖中预应力锚索锚固力损失的成因，阐述损失补偿的关键技术，并探讨长期监测体系的构建，为保障高边坡长期稳定提供技术参考。

[关键词] 高边坡开挖；预应力锚索；锚固力损失；补偿技术；长期监测

[中图分类号] TV551

[文献标识码] A

Compensation and long-term monitoring technology of anchorage force loss of prestressed anchor cable in high slope excavation

Li Changfu

Wen'an County Water Bureau, Langfang City

[Abstract] In high slope excavation engineering, prestressed anchor cable is the core technology to control slope stability, and the long-term effectiveness of its anchoring force is directly related to engineering safety. However, due to the influence of geological conditions, construction technology and environmental factors, the anchorage force is prone to loss, and if it is not compensated in time, it may cause slope deformation or even instability. This paper analyzes the causes of the loss of anchoring force of prestressed anchor cables in high slope excavation, expounds the key technologies of loss compensation, and discusses the construction of long-term monitoring system, so as to provide a technical reference for ensuring the long-term stability of high slopes.

[Key words] high slope excavation; prestressed anchor cable; loss of anchorage force; compensation technology; Long-term monitoring

引言

高边坡开挖广泛存在于水利、交通、矿山等工程中，由于边坡高差大、地质条件复杂，需通过预应力锚索施加主动约束力，平衡边坡岩土体的下滑力。预应力锚索的锚固效果取决于锚固力的稳定性，但其在施工及运营阶段易因多种因素出现损失。研究表明，部分工程的锚索在竣工后1年内锚固力损失可达10%~20%，若超过设计阈值，将严重威胁边坡安全。因此，明确锚固力损失的成因，制定科学的补偿方案，并建立长期监测机制，是高边坡工程从“施工稳定”迈向“长期安全”的关键。

1 预应力锚索锚固力损失的成因分析

1.1 施工阶段的锚固力损失

(1) 岩体与锚索的瞬时变形。高边坡岩体通常存在节理、裂隙，锚索张拉时，锚固段砂浆与岩体接触面会因受力产生塑性压缩，导致短期锚固力下降；同时，钢绞线在高应力作用下会发生松弛，尤其是张拉过程中未充分让应力释放时，这种松弛更为明显，直接造成锚固力损失。(2) 施工工艺的缺陷影响。钻孔精度不足会使锚索体与孔壁接触不均，导致锚固力传递失衡；砂浆灌注不密实会削弱锚固段的握裹力，降低整体锚固效果；锚具安装不规范，如夹片未完全咬紧钢绞线或锚垫板倾斜，会引发锚固力的瞬时衰减，影响张拉后的锁定效果。(3) 张拉程序的不合理性。未采用分级张拉工艺，一次性加载至设

计值会使岩体承受瞬时冲击，后续随岩体变形稳定，锚固力会因应力重新分布而回落；此外，张拉完成后若未及时锁定，钢绞线的弹性回缩也会导致锚固力损失。

1.2 运营阶段的锚固力损失

(1) 地质条件的劣化演变。高边坡开挖后，岩体暴露于外界环境，雨水渗入会软化软弱夹层，降低其抗剪强度，导致边坡内部应力重新分布，锚索所受荷载增大，间接引发锚固力损失；断层、裂隙的轻微活动可能使锚固段岩体产生位移，破坏砂浆与岩体、钢绞线的粘结，进一步削弱锚固效果。(2) 材料性能的自然退化。钢绞线长期处于高应力状态，在潮湿、多腐蚀性介质的环境中易发生应力腐蚀，截面损伤会降低其承载能力；锚具、夹片等金属部件的锈蚀会加剧连接部位的松弛，导致锚固力持续下降；砂浆体在长期受力与环境侵蚀下，可能出现开裂、强度降低，影响锚固力的传递效率。(3) 环境与时效的持续作用。温度变化会使锚索体产生热胀冷缩，反复循环易导致锚固系统出现微变形，引起锚固力波动；岩土体的蠕变特性会随时间累积，使边坡产生缓慢变形，锚索需不断适应这种变形，长期作用下会出现锚固力的缓慢损失；此外，长期的振动也可能加剧锚固系统的疲劳，导致锚固力下降。

2 预应力锚索锚固力损失的补偿技术

2.1 施工阶段的预控与早期补偿

(1) 优化张拉工艺减少初始损失。采用分级张拉方式，按比例逐步加载至设计值，每级加载后保持一定时间，使岩体与锚索系统充分变形并稳定，避免因瞬时应力集中导致后期松弛。同时，通过超张拉工艺抵消钢绞线的初期松弛，待应力稳定后再调整至设计值锁定，从源头减少因材料特性引发的锚固力损失。(2) 强化锚固段施工质量。钻孔完成后需彻底清理孔内岩屑与积水，确保锚固段岩体洁净；灌注砂浆时采用高压注浆工艺，保证砂浆与孔壁、钢绞线紧密结合，避免因空洞、气泡影响握裹力。对地质复杂段，可通过注浆预先加固岩体，提升锚固段的承载基础，减少因岩体压缩导致的锚固力损失。(3) 即时复张拉与锁定控制。锚索张拉锁定后，短期内需进行复张拉检查，若发现锚固力下降超过一定幅度，及时补张拉至设计值。锁定过程中确保锚具安装规范，夹片完全咬紧钢绞线，避免因机械连接不牢导致的锚固力衰减。

2.2 运营阶段的动态补偿技术

(1) 定期复张拉维护。根据边坡安全等级制定复张拉周期，定期对锚索锚固力进行检测，当损失达到预警值时，通过专用设备补张拉至设计值。复张拉过程中控制加载速率，避免冲击荷载对岩体和锚索系统造成二次损伤，同时记录张拉过程中的力值变化，分析损失规律以优化后续补偿周期。(2) 智能补偿系统应用。对高风险边坡，可采用内置传感器与自动张拉装置的智能锚索系统，实时监测锚固力变化。当监测数据显

示损失达到预设阈值时，系统自动启动补张拉程序，实现“监测-补偿”一体化，减少人工干预的滞后性，尤其适用于偏远或复杂环境下的边坡工程。(3) 锚固体系补强加固。对于因岩体劣化、材料腐蚀等导致的不可逆锚固力损失，需结合边坡变形情况采取补强措施。如在原锚索间增设新锚索，分担原有锚索的荷载；对锚固段进行二次注浆，通过注入高强度浆液修复砂浆体的开裂或空洞，恢复其握裹力，弥补锚固力损失。

3 预应力锚索锚固力长期监测技术

3.1 监测内容与指标设计

监测并非仅关注锚固力单一数值，而是需形成“锚固力-边坡变形-环境影响”的多维监测网络。(1) 锚固力核心监测。以锚索实际承受的拉力为核心指标，需覆盖不同深度、不同位置的锚索，尤其是边坡转折处、地质薄弱带及荷载集中区的锚索，全面掌握锚固系统的受力分布。除绝对值外，更需关注锚固力的变化速率，以此判断损失是否处于稳定状态或加速阶段。(2) 边坡变形协同监测。锚固力损失往往伴随边坡内部应力调整，需同步监测边坡表面位移和深部位移。通过变形数据与锚固力变化的关联分析，可区分锚固力损失是因材料自身松弛还是边坡岩体失稳前兆——若变形速率与锚固力损失速率同步加快，需警惕边坡失稳风险。(3) 环境因素关联监测。环境是锚固力损失的重要诱因，需监测降雨量、气温变化、地下水水位及周边振动。通过记录这些参数，可分析环境因素与锚固力损失的量化关系，为针对性补偿提供参考。

3.2 监测设备选型与布设规范

设备的可靠性与布设合理性直接决定监测质量，(1) 设备选型原则。优先选用适应野外复杂环境的设备，要求具备抗干扰、耐候性和长期稳定性。锚固力监测可采用振弦式测力计或光纤光栅传感器；变形监测可选用全站仪、测斜仪；环境监测则采用雨量计、温湿度传感器、水位计等。(2) 布设要点。锚固力传感器需与锚索同轴安装在锚具与承压板之间，确保受力时传感器能准确传递荷载，避免因安装歪斜导致测量偏差；变形监测点需沿边坡走向均匀分布，在坡顶、坡脚、各级平台及地质异常区加密布设，形成“点-线-面”结合的监测网；环境监测设备需布设在边坡影响范围内的代表性区域，避免被遮挡或处于局部小气候区，确保数据代表性。

3.3 数据处理与动态预警机制

(1) 数据处理与规律分析。原始数据需剔除干扰值，通过平滑处理提取真实变化趋势。绘制锚固力随时间变化的曲线，结合边坡变形、环境数据，识别损失的周期性或突发性，总结不同因素对锚固力的影响权重，为预测损失趋势提供模型支持。(2) 分级预警体系。根据边坡安全等级设定多级预警阈值，例如。一级预警。锚固力损失达到设计值的一定比例，或变形速率出现轻微上升，此时需加密监测频率，密切跟踪变

化；二级预警。锚固力损失持续扩大，或变形速率加快，需启动复张拉准备，评估是否需要临时加固；三级预警。锚固力损失超过安全阈值，或边坡出现明显失稳迹象，需立即启动应急补偿措施，并撤离周边人员。（3）监测周期动态调整。施工期至竣工后初期，因岩体与锚索系统尚未稳定，需高频监测；随着边坡趋于稳定，可逐步降低频率，但在特殊时段需临时加密监测，确保不遗漏关键变化节点。

3.4 监测与补偿的联动机制

监测与补偿的闭环核心在于让数据精准指导行动，并通过效果验证持续优化策略。具体而言，监测数据实时上传至管理平台后，系统会自动比对预警阈值，结合锚索历史数据、边坡变形及环境因素，快速定位损失成因，并推送针对性补偿建议。补偿实施时，监测系统同步追踪力值变化，一旦出现异常立即预警，确保操作安全可控。补偿完成后，持续监测锚固力稳定性。若力值稳定，说明措施适配成因；若再次下降，则提示需进一步排查。基于验证结果，可动态优化策略，例如对腐蚀引发的反复损失，缩短补偿周期并加强防腐处理；对岩体压缩导致的损失，在新锚索设计中预留损失空间。这种“监测-决策-验证-优化”的循环，让补偿更精准，既避免盲目操作，又能以更低成本保障边坡长期稳定。

4 工程应用注意事项

4.1 施工与监测的协同配合

施工阶段是锚固力控制的基础，需与监测工作紧密衔接。监测设备应在锚索安装时同步布设，例如在锚索体中预设传感器、在锚具附近安装测力计，避免后期钻孔埋设设备对边坡岩体造成二次扰动，影响锚固效果。张拉过程中，监测数据需实时反馈给施工团队，若发现锚固力异常波动，应立即暂停张拉，检查是否存在孔内砂浆不密实、钢绞线断裂等问题，待排查修复后再继续施工。此外，施工记录需与监测数据对应存档，如张拉日期、初始锚固力值、岩体当时的变形状态等，为后期分析损失规律提供完整的基准资料。

4.2 补偿措施的合理性与安全性

补偿措施的实施需兼顾效果与安全，避免过度补偿或操作不当引发风险。复张拉时，加载速率需严格控制，缓慢平稳地提升力值，防止因瞬时荷载过大导致岩体产生新的裂隙或锚索系统过载断裂。补张拉过程中，需同步观察边坡表面是否出现新的裂缝、异响等异常现象，若有则立即停止操作，评估边坡稳定性后再决定是否继续。对于智能补偿系统，需定期校准设备精度，确保传感器测量准确、自动张拉装置响应可靠，避免因设备误差导致补偿不足或过度补偿。此外，补偿周期的制定需结合监测数据动态调整，若发现某区域锚索锚固力损失速率加快，应缩短该区域的复张拉间隔，而非固守统一周期。

4.3 环境因素的适应性调整

高边坡所处环境复杂多变，技术应用需充分考虑环境影响并灵活应对。在多雨地区，需加强锚索锚固段的防水处理，避免雨水渗入导致钢绞线锈蚀和砂浆强度降低，同时监测设备需具备防水防潮性能，确保数据采集不受天气影响。在温差较大的区域，需关注温度变化对锚固力的影响，冬季低温可能使锚索收缩导致力值上升，夏季高温可能使锚索松弛导致力值下降，补偿时需剔除这种温度引起的“假性损失”，避免盲目补张拉。对于存在腐蚀性介质的边坡，除常规补偿外，还需定期检查锚索材料的腐蚀状况，必要时更换锈蚀部件，从源头减少因材料劣化导致的锚固力损失。

4.4 数据管理与多方协同

锚固力损失补偿与监测涉及设计、施工、运维等多个环节，需建立高效的数据共享与协同机制。施工单位需及时将锚索参数、张拉记录等提交给监测团队，监测团队定期向运维单位推送锚固力变化报告及补偿建议，设计单位则根据长期监测数据优化后续类似工程的锚索设计参数。数据管理平台需具备数据追溯功能，完整记录每根锚索的安装时间、历次补偿记录、监测数据变化等信息，当出现锚固力异常损失时，可快速追溯历史数据排查原因。此外，需对参与各方进行技术培训，确保施工人员掌握正确的张拉工艺、监测人员熟悉设备校准方法、运维人员理解预警阈值的含义及应急处理流程，形成“全员参与、各环节衔接”的管理模式。

5 结束语

高边坡开挖中，预应力锚索锚固力损失是不可避免的工程现象，其补偿与监测需贯穿施工至运营全周期。通过优化施工工艺减少早期损失，采用智能补偿技术应对运营阶段变化，并依托高精度监测体系实现动态管控，可有效保障锚固力长期稳定。未来需进一步研发低成本、长寿命的监测设备与自适应补偿系统，提升高边坡工程的安全保障能力，为复杂地质条件下的边坡稳定提供更可靠的技术支撑。

[参考文献]

- [1]郝健,吴克刚,宋思锐.某道路高边坡开挖爆破施工质量控制实践与研究[J].四川建筑,2023,43(02): 118-120.
- [2]刘云豪.岩质高边坡稳定性分析及加固措施研究[J].土工基础,2023,37(02): 223-226.
- [3]曹钢进,黄志华.水利水电工程中高边坡开挖支护施工技术[J].珠江水运,2023,(07): 9-11.
- [4]豆存成.高边坡开挖施工技术及其质量控制措施[J].产品可靠性报告,2023,(04): 46-47.
- [5]柴伟福.水利工程中的管道基础高边坡开挖技术探究[J].四川建材,2023,49(04): 81-82.