

# 预应力锚索技术在高速公路高边坡施工中的应用研究

崔亦峰, 陈鼎

浙江交工宏途交通建设有限公司, 浙江 杭州 311305

DOI:10.61369/RSTD.2026010001

**摘要**：高速公路建设中，高边坡稳定性直接关系到工程质量、行车安全及周边生态环境。预应力锚索技术凭借锚固力强、变形控制效果好、适应性广等优势，成为高边坡加固的核心技术之一。本文以实际高速公路高边坡工程为依托，从预应力锚索技术的工作原理与核心特性出发，系统分析其在高边坡施工中的设计要点、施工工艺及质量控制措施，结合工程监测数据验证技术应用效果。研究表明，合理设计锚索参数、规范施工流程并强化全过程质量管控，可使高边坡稳定性安全系数提升至1.3以上，有效控制边坡位移量在5mm以内，为高速公路高边坡工程的安全施工与长期稳定提供可靠技术支撑，对类似工程具有重要参考价值。

**关键词**：预应力锚索；高速公路；高边坡；施工技术；稳定性控制；质量监测

## Research on the Application of Prestressed Anchor Cable Technology in the Construction of High Slopes on Expressways

Cui Yifeng, Chen Ding

Zhejiang Jiaogong Hongtu Transportation Construction Co., LTD, Hangzhou, Zhejiang 311305

**Abstract**：In the construction of expressways, the stability of high slopes is directly related to the project quality, driving safety and the surrounding ecological environment. Prestressed anchor cable technology, with its advantages such as strong anchoring force, good deformation control effect and wide adaptability, has become one of the core technologies for reinforcing high slopes. Based on the actual high slope engineering of expressways, this paper starts from the working principle and core characteristics of prestressed anchor cable technology, systematically analyzes its design key points, construction techniques and quality control measures in high slope construction, and verifies the application effect of the technology in combination with engineering monitoring data. Research shows that by rationally designing the parameters of anchor cables, standardizing the construction process and strengthening the quality control throughout the entire process, the safety factor of high slope stability can be increased to over 1.3, and the slope displacement can be effectively controlled within 5mm. This provides reliable technical support for the safe construction and long-term stability of high slope projects on expressways and has significant reference value for similar projects.

**Keywords**：prestressed anchor cable; expressway; high slope; construction technology; stability control quality monitoring

### 前言

本文基于高速公路高边坡施工的实际需求，深入研究预应力锚索技术的应用要点。首先阐述技术工作原理与核心特性，明确其加固优势；其次详细分析设计阶段的参数确定方法与施工全过程的关键工艺；最后结合工程实例，通过监测数据验证技术应用效果，提出针对性的质量控制与优化建议，旨在为预应力锚索技术在高速公路高边坡施工中的规范化应用提供理论与实践参考。

## 一、预应力锚索技术的工作原理与核心特性

### (一) 工作原理

预应力锚索技术的核心原理是通过张拉锚索产生预应力，将边坡潜在滑动体与稳定岩土体紧密连接，利用锚索的抗拉强度抵抗滑动体的下滑力，同时通过预应力传递使边坡岩土体处于受压

状态，提高岩土体的抗剪强度与整体性，从而抑制边坡变形，保障其稳定性。<sup>[1]</sup>

完整的预应力锚索体系主要由锚索体、锚具、锚固段及自由段组成。锚索体通常采用高强度低松弛钢绞线，具备优异的抗拉性能；锚具用于固定锚索并传递预应力，分为工作锚、工具锚与保护锚三类；锚固段是锚索与岩土体形成粘结作用的关键部分，

通过注浆体将锚索拉力传递至稳定岩土体；自由段则用于适应锚索张拉变形，避免预应力损失。施工过程中，通过张拉设备对锚索施加设计预应力，张拉完成后进行锁定，使锚索长期保持预紧状态，持续为边坡提供抗滑约束力，直至边坡岩土体形成稳定的自承结构。<sup>[2]</sup>

## （二）核心特性

1. 锚固力强，稳定性提升显著：预应力锚索可通过调整张拉应力实现不同等级的锚固力，单根锚索锚固力可达数百千牛至数千千牛，能有效平衡高边坡的下滑力，大幅提升边坡稳定安全系数，适用于高度超过30m的高陡边坡加固。

2. 变形控制效果好：通过主动施加预应力，可提前抑制边坡岩土体的塑性变形与蠕变，将边坡位移量控制在允许范围内，避免因变形过大导致的边坡失稳，尤其适用于软岩、破碎岩等易变形地质条件。<sup>[3]</sup>

3. 适应性广，施工灵活：预应力锚索技术可根据边坡地形地质条件，灵活调整锚索长度、孔径、间距等参数，既能适用于岩质边坡，也可用于土质边坡及复合地质边坡；同时，施工设备轻便，可在狭小空间作业，对周边植被与地形的扰动较小，符合绿色施工理念。

4. 耐久性强，维护成本低：采用防腐性能优异的钢绞线与注浆材料，配合完善的防腐措施（如涂油、包裹防腐层、设置防腐套管等），可有效抵御自然环境侵蚀，锚索使用寿命可达50年以上，后期维护工作量少，长期经济效益显著。

## 二、预应力锚索技术在高速公路高边坡施工中的设计要点

### （一）地质勘察与稳定性分析

设计前需开展详细的地质勘察工作，通过钻孔取样、原位测试等手段，获取边坡岩土体的物理力学参数，包括容重、内摩擦角、粘聚力、抗压强度等；同时，结合地形地貌特征，分析边坡的潜在滑动面位置、形态及下滑力大小，明确边坡失稳风险等级。

采用极限平衡法（如瑞典条分法、毕肖普法）对边坡稳定性进行计算，确定未加固状态下的稳定安全系数。根据《公路路基设计规范》（JTG D30-2015）要求，高速公路高边坡稳定安全系数不应低于1.3，若计算结果不满足要求，需通过预应力锚索加固提升稳定性，确保安全系数达到规范标准。<sup>[4]</sup>

### （二）核心参数设计

1. 锚索长度设计：锚索长度由锚固段长度与自由段长度组成。锚固段长度需根据岩土体性质与设计锚固力确定，确保注浆体与岩土体的粘结强度满足要求，一般情况下，岩质边坡锚固段长度为5-10m，土质边坡为8-15m；自由段长度需根据潜在滑动面深度确定，应确保锚固段位于稳定岩土体内，且自由段长度不宜小于5m，以适应张拉变形与温度变化。

2. 锚索孔径与间距：锚索孔径需结合锚索体数量与注浆要求确定，常用孔径为130-150mm，确保注浆体厚度不小于20mm；

锚索间距需综合考虑锚固力分布与边坡受力均匀性，一般为2.5-4.0m，行距与列距保持一致，形成均匀的锚固体系，避免出现应力集中现象。

3. 预应力值确定：预应力值应根据边坡下滑力与锚索数量计算确定，同时需考虑预应力损失（包括张拉损失、锚固损失、温度损失等），一般设计预应力值为锚索极限抗拉强度的50%-70%。例如，采用 $\Phi 15.2\text{mm}$ 高强度钢绞线（极限抗拉强度1860MPa），单根锚索设计预应力可取值150-200kN。

4. 注浆材料设计：注浆材料需具备良好的流动性、粘结强度与耐久性，常用材料为水泥浆或水泥砂浆。水泥宜选用42.5级普通硅酸盐水泥，水灰比控制在0.45-0.55，可掺入适量外加剂（如减水剂、早强剂）提升浆液性能；注浆体28天抗压强度不应低于30MPa，与钢绞线的粘结强度不应低于2.5MPa，与岩土体的粘结强度根据岩土体类型确定，岩质边坡不低于1.5MPa，土质边坡不低于0.8MPa。

### （三）锚固体系选型

根据高速公路高边坡的地质条件与加固要求，选择合适的锚固体系类型。常用的锚固体系包括粘结型锚索、摩擦型锚索与复合型锚索三类。粘结型锚索通过注浆体与岩土体的粘结作用传递拉力，适用于完整性较好的岩质边坡；摩擦型锚索利用锚固段与孔壁的摩擦力传递拉力，适用于破碎岩质边坡或土质边坡；复合型锚索结合了粘结作用与摩擦作用，锚固效果更为可靠，适用于复杂地质条件下的高边坡加固。

此外，需根据边坡高度与受力情况，合理确定锚索布置方式，常用布置方式包括行列式、梅花形与交叉形。对于高度超过40m的高边坡，可采用分级加固方式，每级边坡高度控制在8-10m，设置平台宽度不小于2m，锚索布置与边坡坡面呈 $15^\circ - 25^\circ$ 夹角，确保锚固力有效传递至稳定岩土体。

## 三、预应力锚索技术在高速公路高边坡施工中的关键工艺与质量控制

### （一）施工工艺流程

高速公路高边坡预应力锚索施工需遵循“自上而下、分级开挖、分级加固”的原则，避免因一次性开挖导致边坡失稳，具体工艺流程如下：

1. 边坡开挖与修整：根据设计坡率进行分层开挖，每层开挖高度为2-3m，开挖完成后及时修整坡面，确保坡面平整，无松动岩土体；对于土质边坡，需铺设土工格栅或喷射混凝土进行临时防护，防止雨水冲刷导致坡面坍塌。

2. 钻孔施工：采用潜孔钻或地质钻机进行钻孔作业，钻孔方向需严格按照设计角度控制，偏差不应大于 $1^\circ$ ，孔径与孔深需满足设计要求，孔深偏差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 范围内。钻孔过程中需做好地质记录，若遇到破碎带或软弱夹层，应及时调整钻孔参数与锚固方案。

3. 锚索制作与安装：锚索体采用高强度低松弛钢绞线制作，按设计长度下料，自由段需进行防腐处理（如涂刷防腐涂料、包

裹聚乙烯套管)，锚固段设置定位支架，确保锚索居中布置。锚索安装时采用人工配合机械吊装，避免钢绞线扭曲变形，安装深度需符合设计要求，确保锚固段位于稳定岩土体内。<sup>[5]</sup>

4. 注浆施工：注浆采用压力注浆方式，注浆压力控制在0.5–1.0MPa，确保浆液填充饱满，无孔隙。注浆顺序从孔底向孔口进行，采用二次注浆工艺，第一次注浆初凝后进行第二次注浆，提升锚固段粘结强度。注浆过程中需记录注浆量与注浆压力，若出现注浆量异常或压力骤降，需及时排查故障。

5. 锚索张拉与锁定：注浆体强度达到设计强度的75%以上后，方可进行锚索张拉。张拉设备需提前校验，张拉顺序采用对称张拉，分级施加预应力，每级张拉荷载为设计预应力的25%，每级荷载持荷5分钟，直至达到设计预应力值，持荷10分钟后进行锁定。张拉过程中需监测锚索伸长量，确保实际伸长量与理论伸长量偏差在±6%范围内，若偏差过大，需分析原因并采取调整措施。

6. 封孔与防护：锚索锁定后，切除多余钢绞线，采用水泥砂浆进行封孔处理，封孔深度不小于500mm。同时，对坡面进行永久防护，如喷射混凝土、铺设植草皮等，防止雨水渗透导致锚索腐蚀与边坡失稳。

## （二）质量控制要点

1. 材料质量控制：锚索体、锚具、水泥等原材料需具备出厂合格证与检验报告，进场后需按规范要求进行抽样检测，钢绞线抗拉强度、锚具硬度、水泥强度等指标需符合设计要求；注浆材料配合比需经试验确定，施工过程中严格控制水灰比与外加剂掺量，确保浆液性能稳定。

2. 施工过程控制：钻孔过程中需实时监测钻孔角度与深度，避免出现偏孔、塌孔等问题；锚索安装时需检查防腐处理质量，确保自由段无锈蚀；注浆时需保证注浆压力与注浆量达标，防止出现断浆、漏浆现象；张拉过程中需准确记录荷载与伸长量数据，及时发现并处理张拉异常情况。

3. 监测与检测：施工期间需对高边坡进行实时监测，监测指标包括边坡位移、锚索应力、坡顶沉降等，采用全站仪、应力计、沉降观测桩等监测设备，监测频率为施工期每3天1次，竣工后每月1次，若位移量超过预警值（累计位移 $\geq 10\text{mm}$ 或日位移 $\geq 2\text{mm}$ ），需立即停止施工，采取加固措施。同时，施工完成后需对锚索进行抗拔试验，抽检数量为锚索总数的3%，且不少于3

根，试验荷载为设计预应力的1.5倍，持荷10分钟后无滑移现象即为合格。<sup>[6]</sup>

## （三）工程应用效果验证

以某高速公路K12+350–K12+500段高边坡工程为例，该边坡高度32m，坡度1:0.75，地质条件为中风化砂岩与粉质黏土互层，存在潜在滑动面。采用预应力锚索技术进行加固，共设置锚索240根，锚索长度12–15m，设计预应力200kN，锚固段长度8m。

施工完成后，通过6个月的持续监测，边坡累计位移量最大为4.2mm，日位移量均小于0.5mm，满足规范要求；锚索应力监测结果显示，预应力损失量为设计预应力的3.5%，处于合理范围；抗拔试验中，抽检的8根锚索均未出现滑移现象，极限抗拔力均大于设计值的1.5倍。该工程投入使用3年来，边坡未出现任何失稳迹象，行车安全得到有效保障，验证了预应力锚索技术在高速公路高边坡施工中的良好应用效果。

## 四、结语

预应力锚索技术作为高速公路高边坡加固的关键技术，其工作原理科学、加固效果显著，能有效解决复杂地质条件下高边坡的稳定性问题。本文通过对预应力锚索技术的工作原理、设计要点、施工工艺及质量控制进行系统研究，结合工程实例验证了技术应用效果，得出以下结论：

1. 预应力锚索技术通过施加预应力将滑动体与稳定岩土体连接，可显著提升高边坡抗滑能力，控制边坡位移量在允许范围内，适用于各类地质条件下的高速公路高边坡加固。

2. 设计阶段需基于详细的地质勘察数据，科学确定锚索长度、预应力值、注浆材料等参数，选择合适的锚固体系与布置方式，确保设计方案的安全性与经济性。

3. 施工过程中需严格控制原材料质量、施工工艺与监测检测环节，遵循“自上而下、分级加固”原则，做好钻孔、注浆、张拉等关键工序的质量管控，避免因施工不当导致加固失效。

随着高速公路建设向更复杂的地形地质区域推进，预应力锚索技术将面临更高的要求。未来应进一步加强在复杂地质条件下的参数优化、智能化施工技术研发，提升技术的适应性与可靠性，为高速公路高边坡工程的安全建设提供更有力的技术支撑。

## 参考文献

- [1] 曾懿生. 高速公路高边坡预应力锚索加固施工技术[J]. 交通科技与经济, 2018(02): 53–57, 63.
- [2] 李良平. 公路工程中的高边坡预应力锚索施工技术应用研究[J]. 交通世界, 2024(23): 98–100.
- [3] 石庆波. 预应力锚索技术在公路高边坡施工中的应用[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2017(13): 52–53.
- [4] 杨多虎. 高速公路高边坡预应力锚索施工技术研究[J]. 内蒙古科技与经济, 2025(12): 145–148.
- [5] 夏清, 蒋汶江. 高速公路高边坡防护中预应力锚索的施工技术[J]. 建材与装饰, 2016(11): 231–232.
- [6] 张招兴. 高边坡格构预应力锚索施工与监测技术研究[J]. 福建建材, 2024(05): 87–91.