

大潮高速公路边坡锚索施工质量检测与评价体系研究

文 / 许培东 广东华路交通科技有限公司

摘要：针对大潮高速公路边坡锚索施工质量控制需求，研究构建了涵盖施工过程检测、实体成果检验及长期性能监测的综合质量评价体系。通过动态监控钻孔精度、注浆参数及张拉工艺，结合抗拔试验与结构尺寸检测，系统评估锚索施工质量。同时，建立边坡变形、锚索内力及地下水位的长期监测机制，实现从施工期到运营期的全周期质量管控。研究表明，该体系能有效识别施工偏差并优化工艺参数，保障锚索结构稳定性与边坡长期安全，为类似工程提供可复制的质量管理范式。

关键词：边坡锚索；施工质量检测；评价体系；高速公路

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.19.075

引言

大潮高速公路部分路段因强降雨引发边坡变形，亟需通过锚索加固恢复稳定性^[1]。研究以该工程为背景，聚焦锚索施工质量控制难题，结合现行技术规范与工程实际需求，提出一套覆盖施工全过程、实体检测与长期监测的质量评价体系。研究范围涵盖钻孔、注浆、张拉等关键工序的标准化管控，以及抗拔性能与结构尺寸的量化评估，旨在为复杂地质条件下高速公路边坡整治提供科学依据与技术支撑，提升施工质量与运营安全水平。

一、工程概况

研究依托大潮高速公路排查整治工程。该高速公路位于广东省梅州市大埔县与潮州市饶平县境内，是连接两市的重要通道。研究涉及的工程标段桩号范围为K0+000至K24+425，全长约24.425 km。沿线地质条件相对复杂，边坡类型多样，包括B类边坡与C类边坡等。受2024年4月区域性连续强降雨影响，部分路段路基与边坡出现变形及稳定性下降的迹象，对线路的运营安全构成潜在威胁。为此，开展了以边坡排查整治为核心的应急抢险工程。主要整治措施包括设置锚索框架梁、锚索、钢花管注浆、仰斜式排水孔以及坡面绿化恢复等。工程施工具有“不中断交通”的特点，作业面多位于运营中的高速公路临边区域，对施工安全、交通组织及质量控制提出了较高要求。案例分析选取了K7+100-K7+200段的二级下边坡锚索框架梁以及K6+360-K6+500段的二级下边坡锚索作为首件工程，其施工质量控制与评价过程为本研究提供了实践依据。

二、施工质量检测技术

（一）施工过程检测

施工过程质量检测是确保锚索结构最终性能符合设计预期的基础环节，其核心在于对关键工序的动态监控与实时纠偏^[2]。在锚索钻孔阶段，检测重点在于孔位、孔深、孔径及倾角的准确性。现场采用全站仪与拉线尺对孔位进行双重定位与复核，确保其平面位置偏差控制在±50 mm范围内；利用地质罗盘仪或测角器控制钻机导轨的方位与倾角，误差分别不超过±2°和±1°。钻孔完成后，采用标准钻杆与测绳检验孔深，确保其深度

不小于设计值并满足0.5 m的超深要求，防止因孔底沉渣影响锚固长度。在锚索制作与安装环节，通过抽检钢绞线下料长度、挤压套工艺以及架线环间距，确保锚索体几何参数的合规性。注浆是形成锚固段的关键，过程检测采用压力传感器与流量计实时监测注浆压力与浆液用量。依据设计，一次注浆压力控制在0.5-1.0 MPa，采用孔底返浆法，直至孔口浆液均匀饱满。对地质不良段落采用二次高压劈裂注浆，注浆压力不小于2.5 MPa，稳压时间不少于3 min，通过严格的过程参数控制，保证锚固段浆体与围岩的紧密结合。

（二）实体成果检验

锚索工程实体成果检验是评价施工质量的直接手段，主要通过对已完成结构的物理性能和几何尺寸进行系统性测试与量测。核心检验项目为锚索的基本验收试验，即抗拔试验。根据规范要求，选取不少于锚杆总数5%且不少于3根的锚索进行测试，检验其极限抗拔承载力。试验加载过程严格遵循分级加载原则，通过油压表读数与位移传感器的量测，记录荷载-位移曲线。评判标准为：试验锚索的抗拔力平均值不低于设计值，80%锚索的抗拔力不低于设计值，且最小抗拔力不低于设计值的0.9倍。除抗拔性能外，还需对锚固体相关的结构尺寸进行检验。对框架梁、锚墩等混凝土结构，采用回弹仪法检测其强度，并辅以同批次制作的试块抗压强度试验结果进行验证^[3]。使用钢尺和卡尺对框架梁的截面尺寸、锚墩的平面尺寸及高度进行抽样检测，其允许偏差需符合《公路工程质量检验评定标准》（JTG 5220-2020）的规定，例如锚墩尺寸允许偏差为+10 mm、-5 mm。对锚索张拉锁定后的伸长值进行量测，并与理论计算值进行比较，其偏差是判断张拉施工质量及预应力损失情况的重要指标。

（三）长期性能监测

为评估锚索加固体系在长期运营过程中的服役性能与边坡稳定性演变趋势，需建立一套系统的长期性能监测方案。该方案旨在通过对关键物理量的周期性量测，实现从“被动响应”向“主动预警”的转变。监测体系主要包含边坡变形监测、锚索内力监测及地下水动态监测三个层面。边坡变形监测分为地表和深层两部分，地

表位移通过在边坡平台及坡脚布设的观测桩，利用全站仪定期测量其三维坐标变化来实现；深层位移则通过在边坡关键部位埋设的测斜管，利用测斜仪定期测量坡体内部不同深度的侧向位移^[4]。锚索内力监测通过在代表性锚索上安装锚索计或在框架梁内预埋钢筋应力计，直接获取锚固系统应力的实时数据，反映其荷载分担与衰减情况。地下水位监测则通过在坡体上布设的观测孔，采用人工或自动化设备定期量测，分析其与降雨等外界因素的关联性及其对边坡稳定性的影响。监测频率根据不同时期进行动态调整，施工期及雨季频率较高，可达

每周1次或每日1次，而在正常运营期可适当降低至每月1次。

三、施工质量评价体系

(一) 评价指标构建

构建科学的锚索施工质量评价指标体系是实现客观、全面评价的基础。该体系需覆盖从准备阶段到最终成果的全过程，可划分为三个层级：管理行为质量、工序过程质量与实体成果质量。基于本工程的施工方案与技术规范，具体的评价指标如表1所示。

表1 锚索施工质量评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标	评价要点 / 控制标准
管理行为质量	技术管理	方案与交底	施工组织设计经审批；实施三级技术交底，记录完整。
	记录管理	施工记录	施工日志、检测记录等与施工同步，内容完整，可追溯。
工序过程质量	钻孔工序	孔位精度	孔口偏差≤±20 mm；平面位置偏差≤±50 mm。
		孔斜与方位	倾角误差≤±1°；方位误差≤±2°。
	锚索制作与安装	孔深与孔径	孔深≥设计值+0.5 m；孔径≥设计值。
		下料与编束浆液配合比	钢绞线下料误差≤±50 mm；预留张拉段≥1.5 m；编束平直。符合M30水泥净浆设计，水灰比控制在0.45:1。
注浆工序	注浆压力	一次注浆压力0.5-1.0 MPa，孔口返浆饱满；二次劈裂注浆压力≥2.5 MPa，稳压时间≥3 min。	
实体成果质量	锚固性能	抗拔承载力	基本验收试验通过（平均值≥设计值，最小拔力≥0.9设计值）。
		张拉伸长率	实测值与理论计算值偏差在-15%~+20%范围内。
	关联结构质量	断丝与滑丝	每束≤1根，且每断面≤该断面钢丝总数的1%。
混凝土强度		同条件养护试块抗压强度≥C30设计强度。	
		锚杆 / 锚索位置	最终锚固位置偏差≤±100 mm。

管理行为质量指标主要评价施工组织的规范性，包括施工方案的完备性与交底的有效性、质量管理人员的配置与履职情况、原材料进场检验与台账管理以及施工记录的完整性与可追溯性。这些指标确保了质量控制具备可靠的组织保障。工序过程质量指标聚焦于施工环节的执行情况，涵盖了钻孔工艺参数、锚索制作与安装质量以及注浆施工参数。实体成果质量指标则是对最终成品的检验，主要包括锚索抗拔承载力、张拉锁定后的预应力吨位与伸长值、框架梁等关联构件的混凝土强度与几何尺寸。通过对这三个层级下具体指标的量化考核，形成一个多维度、全覆盖的评价网络。

(二) 综合评价模型

为对锚索施工质量的综合评判，可构建一个基于层次分析与加权评分的综合评价模型。该模型的核心思想是将复杂的质量问题分解为多个层次的、可量化的评价因子，并根据其重要性赋予相应权重，最终通过综合计算得出评价结果^[5]。首先，将总体质量目标（ Q ）分解为上文所述的管理行为（ Q_m ）、工序过程（ Q_p ）和实体成果（ Q_e ）三个一级指标。然后，再将各一级指标细化为若干个可直接检测或评判的二级指标（如钻孔合格率、抗拔试验通过率等）。评价模型的数学表达可简化为式（1）：

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i \cdot S_i \quad (i = m, p, e) \quad (1)$$

其中， Q 为综合质量得分； w_i 为第 i 个一级指标的权重系数，其值由项目技术特点及专家经验确定，且满足 $\sum w_i = 1$ ； S_i 为第 i 个一级指标的得分，该得分由其下属二级指标的标准化得分加权平均得到。二级指标的得分通常通过现场实测数据与设计、规范标准的符合度来评定。例如，对于实体检测项，可采用合格率计分；对于过程控制参数，可根据其偏离允许范围的程度进行扣分。首件工程制度是该模型在实践中应用的重要载体，通过对首件工程的全面评价，验证并优化权重系数与评分标准，使模型更贴合工程实际，从而为后续大面积施工的质量评定提供一个标准化的作业框架。

(三) 质量反馈机制

有效的质量反馈机制是实现施工质量持续改进和闭环管理的关键环节。该机制构建了一个从问题发现到最终解决的信息流与管理流。质量反馈机制流程如图1所示。

其流程始于施工过程中的自检、互检以及监理工程师的巡检与旁站。一旦检测结果显示存在质量偏差或不合格项，例如首件施工中发现的“模板加固间距过大导致涨模”或“模板底部封堵不密实造成漏浆”等问题，质量反馈机制即被触发。现场施工人员或质检员需立即填写不合格项报告（Non-Conformance Report, NCR），详细记录问题现象、发生位置及初步原因分析。该报告随即提交至项目技术负责人与监理工程师。技术与管理人员在核实问题后，共同研究制定纠正与预防措施，如“加密模板立模加固间距”或“加强对薄弱环节的处理”。

这些措施以书面形式下达到施工班组，并明确整改时限与责任人。整改完成后，需再次进行专项复检，直至确认合格后方可进入下一道工序。所有不合格项的发现、处理与复检过程均被详细记录，形成质量档案。这种机制不仅能及时纠正已发生的问题，还能通过对共性问题的归纳分析，为后续施工提供预警和改进建议，从而系统性地提升整体施工质量。

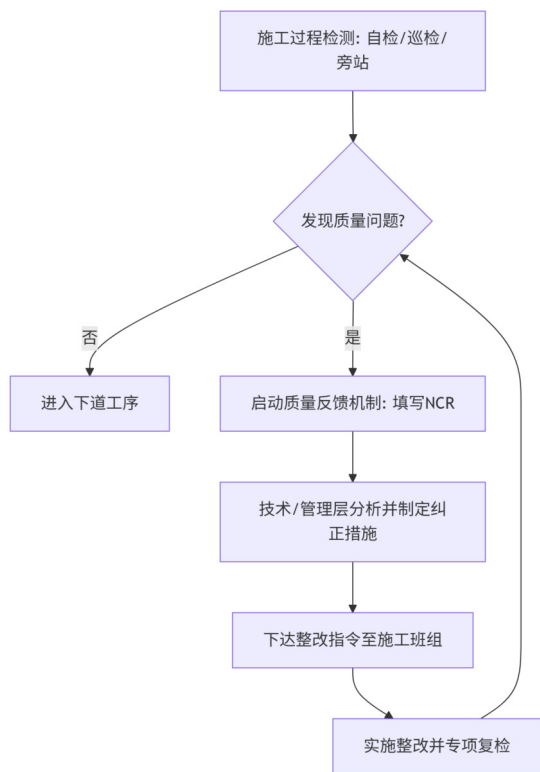


图1 质量反馈机制流程图

四、工程应用分析

通过应用前述的检测技术与评价体系，对施工全过程进行了监控。过程检测显示，框架梁刻槽深度在39cm至44cm之间，满足40cm的设计要求；N4箍筋间距实测平均值为14.9cm，与15cm的设计值符合良好。实体检测结果表明，各项指标均满足设计与规范要求，如表1所示。

表2 K7+100-K7+200段锚索框架梁首件工程关键指标检测评价表

检测层级	检测项目	设计要求	实测结果 / 状态
工序过程质量	框架梁刻槽深度 /cm	40	39 ~ 44
	N4 箍筋设计间距 /cm	15	14.4 ~ 15.3
	模板安装稳固性	稳固，无变形	检查通过
实体成果质量	混凝土浇筑方量 /m ³	63	64
	N5 倒角筋长度 /cm	102.88	105
管理行为质量	混凝土外观质量	无严重蜂窝、麻面	局部少量麻面
	原材料进场报验	资料齐全	全部报验
	施工过程记录	完整、同步	记录完整

为验证所构建评价体系的有效性，研究根据锚索工程中各评价维度对结构最终安全性和耐久性的影响程度，基于现场检测数据，综合评价模型的具体计算过程与结果如表3所示。

表3 K7+100-K7+200段首件工程综合评价表

一级指标	二级指标	权重	得分	加权得分
管理行为质量	技术管理	0.1	98.5	9.9
	记录管理	0.1	99	9.9
一级指标得分		0.20	98.8	19.8
工序过程质量	钻孔工序	0.1	98	9.8
	锚索制作与安装	0.1	97.5	9.8
一级指标得分		0.30	97.2	29.2
	注浆工序	0.1	96	9.6
实体成果质量	锚固性能	0.25	99.2	24.8
	关联结构质量	0.25	96.5	24.1
一级指标得分		0.50	97.9	48.9
综合质量得分		1.00		97.9

根据模型计算结果，该首件工程的综合质量得分为97.9分，评定等级为“优秀”。分析表明，该综合评价模型能够将定性的规范要求与定量的现场数据相结合，提供一个清晰、客观、可量化的评价结果。

结语

研究构建的边坡锚索施工质量检测与评价体系，通过多维度指标量化管控施工工艺与实体质量，有效解决了动态施工中质量偏差的识别与纠偏问题。实践验证表明，体系可显著提升锚索结构的抗拔性能与长期稳定性，为高速公路边坡整治工程提供系统化解决方案。未来可进一步优化评价模型权重参数，强化监测数据与风险预警的关联性分析，推动质量控制从经验驱动向数据驱动转型，助力复杂地质环境下交通基础设施的安全可持续发展。

参考文献

- [1] 韩根. 公路高边坡预应力锚索抗滑桩施工技术 [J]. 北方建筑, 2024, 9(02): 104-107.
- [2] 劳春江. 高速公路高边坡治理工程中预应力锚索设计及施工技术 [J]. 黑龙江交通科技, 2023, 46(12): 17-19.
- [3] 戴湘波. 高速公路高边坡防护中预应力锚索施工技术 [J]. 交通世界, 2023, (28): 118-120.
- [4] 阿卜杜热西提·艾合麦提尼亚孜. 高速公路施工高边坡预应力锚索施工技术 [J]. 工程机械与维修, 2023, (04): 173-175.
- [5] 梁伟锡. 预应力锚索技术在高速公路高边坡施工中的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(02): 207-209.

作者简介：许培东(1994-01)，男，广东揭阳普宁人，汉族，本科，助理工程师，研究方向为高速公路工程施工管理。