

# 隧道施工过程中的监测与控制技术探讨

文 / 姚孝武 中铁十一局集团第三工程有限公司

**摘要:** 隧道工程作为现代交通建设的重要组成部分,其施工过程涉及地质勘探、开挖支护、衬砌浇筑等多个复杂环节,对安全与质量的要求极高。在隧道掘进的每一步中,围岩的稳定性、地下水位的变化、施工应力的分布等因素均可能对项目造成重大影响。本文旨在深入探讨隧道施工监测与控制技术的最新进展与应用实践,包括布设监测控制网、锚杆拉力监测、围岩压力监测等方面,以期为隧道工程的安全施工与质量管理提供有力支持。

**关键词:** 隧道施工; 监测; 控制技术

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.04.015

## 引言

隧道施工过程中的监测与控制技术显得尤为重要。

这些技术不仅能够帮助工作人员实时掌握工程动态,及时发现并处理潜在的安全隐患,还能为施工方案的优化调整提供科学依据,确保隧道工程的顺利进行。

### 一、隧道施工过程中的监测与控制的重要性

#### (一) 保障施工安全,预防灾害发生

隧道工程往往面临复杂多变的地质条件,如断层、溶洞、地下水丰富区等,这些潜在的地质风险若处理不当,极易引发坍塌、突水突泥等严重安全事故。因此,实施全面而细致的施工监测显得尤为重要。通过布设位移计、应力计、渗压计等监测设备,实时监测隧道围岩的稳定性、支护结构的受力状态及地下水位的动态变化,能够及时发现异常现象并预警,为施工方提供宝贵的决策依据。及时采取加固、排水、注浆等应急措施,可以有效避免安全事故的发生,保障施工人员的生命安全,减少财产损失<sup>[1]</sup>。

#### (二) 控制施工质量,提升工程品质

隧道施工的最终目标是建成结构安全、功能完善、耐久性好的交通通道。施工过程中的监测与控制对于实现这一目标至关重要。一方面,通过对开挖面平整度、衬砌厚度、混凝土强度等关键参数的监测,可以确保施工符合设计要求,防止偷工减料或施工质量不达标的情况发生。另一方面,通过监测隧道收敛变形、衬砌应力分布等,可以评估隧道的长期稳定性和耐久性,为后续与维护保养提供科学依据。此外,精准的监测数据还能帮助优化施工方案,比如调整开挖步序、改进支护设计,从而提升施工效率,降低成本,最终提升工程整体品质。

### 二、隧道施工过程中的监测要点

#### (一) 布设监测控制网

在隧道施工的广阔舞台上,监测控制网如同一张无形的安全网,其精准布局与高效运行直接关系到整个工

程的顺利进行。监测控制网的建立需遵循科学规划、合理布局的原则,确保监测点位的全面覆盖与关键区域的重点聚焦。工作人员应根据隧道的地质条件、开挖方式、支护设计等综合因素,精心选定监测点,构建出既能反映整体变形趋势,又能捕捉局部异常现象的监测网络。监测控制网应包括洞内与洞外两部分,洞内监测主要围绕隧道围岩结构及支撑状况展开,通过布设多点位移计、应力计等传感器,实时监测围岩的变形、应力状态及支护结构的受力情况;洞外监测则侧重于地表下沉、周边建(构)筑物变形等,采用高精度水准仪、全站仪等设备,确保数据的准确性与时效性。此外,为了实现监测数据的快速传输与智能分析,还需建立先进的信息化管理系统,将各监测点数据实时集成至云端平台,通过大数据分析 with 算法预测,为施工管理提供及时、全面的决策支持<sup>[2]</sup>。

#### (二) 主要监测项目

在隧道施工的监测体系中,超前地质预报、隧道内外日常观测及地表下沉监测等项目构成了保障施工安全与质量的关键环节。超前地质预报是隧道施工中的“侦察兵”,通过地质雷达探测、超前钻井、TSP203系统等先进技术手段,对隧道前方潜在的不良地质体进行精准预测。这些技术手段各具特色,地质雷达以其高分辨率、无损探测的优势,能够揭示岩体的内部结构;超前钻井则通过直接取样,提供更为直观的地质信息;而TSP203系统则利用地震波反射原理,实现长距离、大范围的超前探测。在实施过程中,应根据隧道的地质复杂程度、施工进度等因素,灵活选择预报方式,并合理设定量测间隔,确保预报结果的准确性与及时性。隧道内外的日常观测是监测工作的基础与常态,工作人员要有高度的责任心与敏锐的洞察力。在隧道掌子面,每次爆破后都应立即进行现场观测,记录地质状况的变化情况;在地质状况相对稳定时,也应坚持每日对隧道内及

附近工作区域进行全面检查，及时发现并处理潜在的安全隐患。此外，对于洞外情况，同样不能掉以轻心，需定期观测地表沉降、周边建（构）筑物变形等，确保隧道施工不对周边环境造成不良影响。在观测过程中，应充分利用地质罗盘、规尺等简单实用的工具，结合专业知识与经验判断，确保观测结果的准确性与可靠性。对于浅埋隧道而言，地表下沉监测尤为重要。它直接关系到隧道上方地表建筑、道路及居民生活的安全<sup>[3]</sup>。在监测过程中，应根据隧道埋深、地质条件等因素，在隧道轴线两侧合理选定监测截面，并在每个截面上布设测点，以全面反映地表下沉情况。在监测工具的选择上，可采用高精度水平尺或测微仪等精密仪器，确保测量数据的准确性。

### （三）锚杆拉力监测

在隧道工程的复杂环境中，锚杆拉力监测不仅是技术保障的关键环节，更是安全管理不可或缺的一部分。从理论层面来看，锚杆拉力监测的引入是基于对隧道工程力学特性的深刻理解。隧道掘进过程中，围岩的应力重分布、地下水文条件的变化以及地质构造的复杂性，都使得支护结构面临着动态变化的挑战。锚杆作为连接围岩与支护结构的关键纽带，其拉力变化直接反映了支护系统的响应能力。因此，通过精确监测锚杆拉力，可以实时掌握支护结构的受力状态，为工程安全提供预警。在实践操作层面，锚杆拉力监测的实施涉及多个关键环节。从锚杆材料的选择到锚固工艺的控制，每一步都直接关系到监测结果的准确性和可靠性。采用高强度、耐腐蚀的922钢作为锚杆材料，配合高性能的M30早强水泥进行锚固，不仅提高了锚杆的承载能力和耐久性，也为长期监测提供了稳定的基础。同时，合理的监测断面布置和锚杆数量配置，确保了监测数据的全面性和代表性，为后续的数据分析提供了有力支持。在监测过程中，利用先进的拉拔器和锚杆测力计等精密仪器，实现了对锚杆拉力的实时、连续监测。这些仪器能够准确捕捉锚杆在张拉锁定阶段及工作过程中的受力变化，为工程人员提供了直观、可靠的监测数据。通过对监测数据的深入分析，可以及时发现支护结构中的潜在问题，如锚杆拉力异常增大、支护结构变形等，为采取针对性的加固措施提供科学依据。此外，锚杆拉力监测还促进了隧道工程技术的持续改进和创新。通过对监测数据的积累和分析，可以不断优化锚杆的设计参数、施工工艺和监测方案，提高支护结构的整体性能和安全性。同时，锚杆拉力监测也为隧道工程的安全风险评估和应

急预案制定提供了重要参考，为工程的安全、有序进行提供了有力保障<sup>[4]</sup>。

### （四）围岩压力监测

在隧道工程领域，围岩压力监测是构筑安全施工与结构稳定的基石。它聚焦于隧道掘进期间，围岩在复杂应力场下对衬砌产生的动态压力变化，是评估隧道即时承载能力及长期耐久性的关键指标。采用地土压力计与频谱接收仪的联合监测方案，实现了对围岩压力的高精度、非侵入式测量。在隧道初衬施工前夕，技术人员依据地质勘察结果，精准选定监测点位，巧妙埋设土壤压盒，确保监测数据的真实性与代表性。频谱接收仪则以其独特的非接触测量技术，通过监测压盒形变引发的频率微妙变化，间接而精准地计算出围岩对衬砌的实时压力值，实现了数据的连续、动态采集。此监测体系不仅简化了操作流程，提高了数据收集效率，更关键的是，它赋予了工程管理者一双“透视眼”，能够即时洞察围岩压力的动态演变，为施工决策提供科学依据。一旦发现围岩压力异常，即可迅速响应，采取针对性加固措施或调整施工方案，有效遏制潜在安全风险，保障隧道施工的安全推进。此外，长期积累的围岩压力监测数据，如同隧道工程的“健康档案”，为后续的结构维护与稳定性评估提供了宝贵资料。它不仅有助于优化隧道设计，提升工程质量，还能为类似工程提供经验借鉴，推动隧道工程技术的持续进步与发展。因此，围岩压力监测不仅是隧道施工过程中的一道安全防线，更是提升隧道工程整体性能与使用寿命的重要推手<sup>[5]</sup>。

## 三、隧道施工过程中的控制技术

### （一）衬砌背后注浆

在隧道工程施工过程中，衬砌背后注浆作为关键工序，其精细操作与科学规划对隧道安全与稳定至关重要。前期灌浆加固，如同为隧道穿上“隐形盔甲”，通过高压注入浆液，精准填补围岩与衬砌间的细微裂缝，实现土体的紧密固结。此阶段，注浆材料的选择与配比需严格把控，以确保浆液能够有效渗透并固化土体，减少施工扰动，促进岩土体稳定。进入二次衬砌后的补充灌浆阶段，滞后作业面的设置不仅确保了灌浆作业的及时性，还避免了与主体施工流程的冲突，提高了整体施工效率。拱顶45度角预埋灌浆管道的创新设计，更是将灌浆的精准度与覆盖面提升至新高度，确保了浆液能够均匀分布至关键区域，进一步强化隧道结构的整体性。当喷射混凝土层达到一定强度之后进行注浆作业，保障

喷射混凝土层作为的稳固，能够有效支撑灌浆作业带来的压力，同时也为灌浆浆液提供了更为理想的渗透环境，促进了浆液与围岩的充分结合，进而提升了隧道结构的抗渗性、承载力和耐久性，为隧道工程的长期安全运营奠定了坚实基础。

### （二）设置锁脚锚杆

在隧道开挖过程中，特别是在地质条件复杂、自稳能力较差的地段，锁脚锚杆的布置需尤为谨慎。工作人员需依据现场实际情况，科学规划锚杆的位置与数量，确保其在控制沉降、增强拱部稳定性的同时，不影响后续施工工序的顺利进行。对于锁脚锚杆的选材，直径5毫米的无缝钢管因其良好的机械性能和耐腐蚀性，常被用作浅部锚杆的管材。这些锚杆长度通常设计为3米，确保能够深入围岩，提供足够的锚固力。在安装过程中，工作人员需精准定位锚杆孔位，确保锚杆能够准确锚定在拱脚下方的关键位置。对于深部锚杆，则采用直径42毫米、长度3.5米的无缝钢管，这类锚杆的直径与长度设计均经过精密计算，旨在满足深部围岩的加固需求。深部锚杆在安装前需进行充分的预应力设计，通过施加适当的预紧力，使锚杆与围岩之间形成紧密的结合，从而提高整体支护结构的稳定性。此外，为确保锁脚锚杆的支护效果，工作人员还需严格控制锚杆的安装质量。从钻孔、清孔、注浆到锚杆张拉等每一个环节，均需严格按照操作规程进行，避免任何可能影响锚杆性能的操作失误。特别是在注浆环节，应确保注浆材料性能优良、注浆饱满密实，以充分发挥锚杆的锚固作用。

### （三）超前注浆加固

面对复杂多变的地质环境，超前注浆加固技术犹如一把锋利的“手术刀”，精准地切割着施工安全与围岩稳定的潜在威胁。这项技术不仅是对传统施工方法的革新，更是对地质挑战的智慧回应，其重要性在每一次成功的工程实践中得以彰显。超前注浆加固的核心在于“预防”与“控制”。面对松散、破碎的围岩，其固有的不稳定性如同定时炸弹，随时可能威胁施工人员的安全与工程的顺利进行。通过超前钻孔，将特制的浆液注入围岩裂隙深处，浆液在压力作用下逐渐扩散、渗透，直至充满整个裂隙空间。这一过程中，浆液中的胶凝物质与围岩颗粒发生化学反应或物理结合，形成坚固的结石体，不仅封堵了渗水通道，还极大地增强了围岩的整体强度和稳定性。然而，注浆过程并非一蹴而就，其成败关键在于对注浆参数的精细调控。注浆压力与注浆速

率需根据围岩的具体条件灵活调整，既要保证浆液能够充分扩散至裂隙深处，又要避免对围岩造成过大压力而引发新的形变或破坏。同时，注浆材料的选择与配比同样至关重要，通过加入适量的速凝剂或早强剂，可以加速浆液的凝固过程，缩短加固周期，提高加固效率。在注浆前，对围岩进行充分的排水处理是不可或缺的一步。通过设置排水孔或渗流井，有效降低土壤中的含水量，可以减少水分对围岩的软化作用，降低施工过程中的变形风险。此外，注浆效果的监测与评估也是确保工程质量的重要手段。通过安装压力传感器、位移计等监测设备，实时掌握注浆过程中围岩的应力变化与变形情况，为后续的工程决策提供科学依据。超前注浆加固技术不仅解决了围岩形变的问题，还在一定程度上改善了土壤的力学性质。注浆后，围岩的摩擦角与内聚力显著提升，抗剪强度与整体稳定性得到加强，为隧道的后续开挖与支护提供了有力保障。特别是在处理那些具有强不稳定特性的特殊位置时，如断层、破碎带等，通过优化注浆孔位布置、调整注浆参数等措施，可以进一步提升加固效果，确保工程安全顺利进行。

### 结束语

综上所述，隧道施工过程中的监测与控制技术是现代隧道工程不可或缺的一部分。通过综合运用多种监测手段与先进的控制技术，我们能够实现对隧道施工全过程的精细化管理与精准化控制，有效保障施工安全与质量。随着科技的不断进步与应用的不深入，隧道施工监测与控制技术将向着更加智能化、自动化、信息化的方向发展，为隧道工程的高效建设与管理提供更加坚实的技术支撑。

### 参考文献

- [1] 杨子鹏. 隧道施工过程中的岩体监测与控制技术研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(20): 24-26.
- [2] 刘一飞. 高速公路超特长隧道施工过程监测监控要点研究[J]. 运输经理世界, 2022, (33): 74-76.
- [3] 赵康康, 曾保金, 丁世武, 等. 隧道监控量测在隧道施工中的应用[J]. 云南水力发电, 2019, 35(06): 51-54.
- [4] 王颖. 土压平衡盾构隧道地表沉降特性分析[J]. 工程机械与维修, 2022, (03): 54-56.
- [5] 赵堃. 电力工程暗挖隧道施工过程中结构变形监测与分析[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(09): 142-143.