山区高速公路隧道围岩变形监测检测方案优化

何　聪

山西省交通建设工程质量检测中心（有限公司）　山西　太原　030032

摘　要：山区高速公路隧道施工面临复杂地质条件与高度不确定性，围岩变形监测是保障施工安全与结构稳定的核心手段。当前监测方案在测点布设、仪器选配、数据采集与反馈机制等方面仍存在针对性不足、响应滞后、信息利用效率低等问题，难以完全适应山区隧道“长、大、深、险”的工程特征。本文从围岩变形机理与监测需求出发，系统分析既有监测检测方案的结构性缺陷，围绕“分层布控、动态调整、协同感知、快速反馈”的优化思路，提出涵盖空间布设优化、多源数据融合、预警阈值动态修正及组织管理流程再造的综合优化框架，旨在构建更加科学、精准、高效的围岩变形监测检测体系，为类似工程提供理论参考。

关键词：山区高速公路；隧道工程；围岩变形；监测方案；优化设计

引言

近年来，我国高速公路网加速向西部山区和复杂地形区域延伸，隧道工程在路线方案中的占比持续攀升。山区隧道不仅里程长、埋深大，且往往穿越断裂构造带、软弱夹层、高地应力区等不良地质体，施工期围岩失稳事件频发，严重威胁作业人员安全与工程进度。围岩变形监测作为新奥法施工的核心环节，其根本任务在于及时捕捉围岩力学响应的时空演化特征，为支护参数调整与施工决策提供可靠依据。然而，大量工程实践表明，现行监测方案多沿用一般性技术规程，对山区特殊地质环境的适应性不足，监测数据“测而不准、准而不判、判而不快”的问题较为突出。因此，立足于山区隧道围岩变形的本质特征，系统审视并优化现有监测检测方案，具有显著的理论价值与现实意义。与此同时，随着隧道建设规模不断增大，施工速度与安全管控之间的矛盾日益尖锐，传统的以经验为主的监测模式已难以适应现代隧道工程信息化施工的要求，亟需从理论层面构建更具科学性的优化路径。

1 山区高速公路隧道围岩变形特征与监测需求分析

1.1 围岩变形的主要影响因素与时空规律

山区隧道围岩变形受地质构造、岩体结构、地应力场、地下水及施工扰动等多重因素耦合控制，呈现出显著的时空变异特征。从空间维度看，变形主要发生于掌子面附近及后方一定范围内的围岩松动圈，其量值与扩展深度取决于岩体质量等级和初始地应力水平。从时间维度看，围岩变形一般经历急剧增长、缓慢收敛至趋于稳定的演化过程，但高地应力软岩和断层破碎带段常表现出持续流变特性，稳定周期大幅延长。准确把握上述规律，是合理设计监测方案的基本前提。

1.2 山区环境对监测检测的特殊约束

山区复杂地形与气候条件对监测检测工作施加了多重约束。在实施条件方面，隧道进出口多位于陡坡峡谷地带，施工场地狭窄、交通不便，限制了大型监测设备的部署与维护。在监测环境方面，隧道内湿度大、粉尘多、电磁干扰强，对仪器耐久性和信号传输质量构成严峻考验。在地质条件方面，山区隧道穿越的地层岩性变化频繁，围岩分级沿纵向呈现高度非均匀性，固定不变的监测方案难以有效响应地质条件的快速变化。

1.3 围岩变形监测的功能目标与性能要求

基于上述特征，山区隧道围岩变形监测应同时满足以下功能目标：其一，全面性，即监测断面与测点布置能有效覆盖各类典型地质区段和关键变形模式；其二，及时性，即数据采集、传输与处理的时效性满足施工预警的响应需求；其三，准确性，即监测数据真实反映围岩实际状态，误差控制在工程可接受范围；其四，鲁棒性，即监测系统在恶劣环境下仍能持续稳定运行。当前多数监测方案在上述性能指标上仍有明显短板，亟需通过系统性优化予以改善。

2 既有监测检测方案的问题审视

2.1 监测点布设与断面选取的合理性不足

现行规范对监测断面间距和测点数量作出了原则性规定，但山区隧道地质条件沿纵向剧烈变化的特点使得统一标准难适用。实践中普遍存在断面选取

缺乏针对性、高风险区段监测密度不足而稳定区段过度布设的失衡现象。尤其在断层破碎带及其影响带范围内，监测断面的空间分辨率往往不足以捕捉围岩变形的局部突变特征，导致关键预警信息被遗漏[1]。此外，测点布设主要依赖工程经验，缺少基于围岩分级动态调整的量化准则。

2.2 监测手段单一与数据协同性薄弱

当前多数隧道采用收敛计或全站仪进行定期断面量测，辅以少数多点位移计监测围岩内部变形。这种以常规变形监测为主的手段配置，虽能满足基本位移量测需求，但在监测频率、空间覆盖度和信息丰富度方面存在天然局限。不同监测手段获取的数据往往相互独立存储、独立分析，缺乏有效的数据融合机制，难以形成对围岩力学状态的多角度综合判断。声发射、微震监测等具有早期预警潜力的技术手段在常规方案中应用不足。

2.3 信息反馈滞后与预警机制僵化

监测信息从现场采集到分析反馈的流程链条较长，数据录入、处理、报表生成等环节人工干预过多，严重削弱了监测信息的时效价值。同时，预警阈值的设定多采用固定经验值，未充分考虑围岩分级变更、支护措施调整和施工进度变化等动态因素，导致误报与漏报并存。监测成果向施工指令的转化缺乏标准化接口，技术人员的分析结论与现场作业指令之间存在信息损耗与时间延迟。

3 监测检测方案优化策略

3.1 基于围岩分级的分区动态布设优化

优化方案的首要举措是建立“分级分区、动态调整”的监测布设原则。根据施工期围岩分级结果将隧道全段划分为稳定区、过渡区和风险区三个管理等级，对应不同的监测断面间距和测点配置标准。风险区断面间距加密至常规方案的二分之一至三分之一，并增设围岩内部变形和支护结构受力测点；过渡区维持常规标准；稳定区可适当放宽监测频次。分区布设的核心在于监测资源的差异化投放，使有限的人力物力集中于风险贡献最大的区段，避免均匀布设带来的资源浪费与关键区域监测不足并存的两难局面[2]。同时建立围岩分级变更触发机制，当掌子面揭示地质条件发生变化并引起围岩分级调整时，监测方案随之动态修正。变更触发机制应明确响应时限和调整幅度，确保从地质信息获取到监测方案更新的操作流程有章可循，确保监测资源配置与风险水平实时匹配。

3.2 多手段融合的协同监测体系构建

打破单一变形量测的局限，构建“表面位移 + 内部位移 + 应力应变 + 地球物理”多方法协同的立体监测体系。具体而言，以全站仪自动化监测系统实现断面收敛和拱顶下沉的高频次测量，该方法具有非接触、大范围的优势，适合作为常规监测的主干手段。以多点位移计和钻孔倾斜仪监测围岩深层变形及滑动面位置，多点位移计宜按不同孔深布设于拱顶、拱腰和边墙部位，以获取围岩松动圈范围及其演化信息。以锚杆测力计和压力盒获取支护结构与围岩接触力学参数，为支护效果评价提供定量依据。在地质条件极端复杂区段辅以微震监测进行前兆信息捕捉，通过对微震事件时空分布与能量释放特征的分析，判断围岩内部破裂发展趋势。不同监测手段之间形成空间互补和时间叠合，通过统一的数据采集平台实现多源信息的同步记录与集成管理，从根本上消除信息孤岛现象。

3.3 测点布设的力学合理性设计

监测测点的布设位置与方向应基于围岩变形力学模式的深入分析加以确定。对于以竖向沉降为主的软岩隧道段，拱顶下沉测点应加密并增设拱腰辅助测点，以捕捉不均匀沉降特征[3]。对于水平构造应力占主导的高地应力段，周边收敛测点应重点布置于两侧边墙的中部高度，该位置通常是水平收敛位移的最大部位。对于偏压地形条件下的隧道段，应在埋深较浅一侧增布测点以监测非对称变形趋势。此外，各测点应沿隧道轴向形成纵向监测剖面，剖面间距依据围岩级别和管理等级综合确定，确保每个独立地质单元内均有足够的监测数据支撑稳定性判断。

3.4 数据采集传输与智能处理的集成优化

针对山区隧道恶劣环境下的数据传输难题，优化方案采用有线传输与无线中继相结合的混合组网模式。关键监测断面布设数据采集站，各传感器信号经汇集后通过光纤骨干网络传输至洞口监控中心，光纤传输具有带宽大、抗干扰能力强的优势，适合长距离稳定传输。不具备有线敷设条件的临时测点采用低功耗无线模块实现数据接力传输，无线中继节点沿隧道壁间隔布设，形成链式网络，确保数据传输的连续性与可靠性。监控中心部署专业监测数据处理软件，集成数据预处理、异常值识别、趋势分析与预警判断等功能模块。数据预处理包括滤波去噪、零漂校正和温度补偿等环节，是保证后续分析质量的基础。异常值识别采用基于统计分布和时序一致性的双重判别准则，有效区分真实异常与测量误差。趋势分析模块内置多种变形预测模型，可根据实测数据自动选择最优拟合方式，实现从原始数据到有效信

息的自动转化，最大限度减少人工操作环节带来的延误与误差。

3.5 动态预警阈值与多级响应机制设计

摒弃固定阈值预警模式，建立基于围岩变形速率、累计变形量与变形加速度三参数耦合的动态预警指标体系。各指标的预警阈值依据围岩级别、埋深条件和支护设计进行初始设定，在施工过程中根据实测数据的统计特征和收敛趋势进行自适应修正。速率阈值反映当前变形的活跃程度，累计位移阈值表征变形的总体规模，加速度阈值则对速率突变具有超前指示意义，三者相互印证、综合判定。预警等级划分为关注级、警示级和警报级三级：关注级提示变形有活跃趋势，建议加强观察频次；警示级表明变形接近或达到设计预留量的一定比例，建议调整支护参数或施工速率；警报级则代表变形超限或速率急剧增长，须立即停工撤人并启动应急预案[4]。每级对应明确的响应流程和处置权限，确保预警信号能够快速转化为具体的工程指令并落实至作业面。

3.6 监测检测流程标准化与组织管理优化

技术方案的优化最终需要依托规范化的组织实施来落地。优化后的监测检测流程包括施工准备阶段的基线方案编制、开挖过程中的动态调整、异常工况下的加密监测和完工后的资料整编归档四个阶段。每一阶段均明确责任主体、操作标准和成果形式，形成闭合的管理回路。施工准备阶段应完成监测仪器标定、初始值采集和方案评审等技术准备；开挖实施阶段按照动态方案执行日常监测并及时上报异常；异常加密阶段在预警触发后自动提升监测频率和上报级别；收尾归档阶段对全部监测资料进行系统整理与综合分析。同时，建立监测-设计-施工三方信息联席会商机制，规定监测成果每日通报、预警信息即时推送的沟通规则，打通监测信息从采集端到决策端的快速通道。监测单位的独立性应予以制度保障，使其在安全判断上不受施工进度压力的干扰。

4 优化方案的综合效益与实施保障

从预期效果来看，优化方案的核心价值在于实现了监测资源的精准投放与信息流转的效能提升。分区动态布设可使高风险区段的监测密度提高、低风险区段资源节约，在总体成本可控的前提下显著增强了对关键区段变形风险的把控能力。多手段协同与数据智能处理的结合，有助于提前识别围岩异常变形的前兆特征，为施工决策争取宝贵的时间裕度。动态预警阈值则降低了误警率，提高了预警系统的可信度和现场执行意愿。在实施保障层面，优化方案的推行需要配套解决三个关键问题：一是设备选型应充分考虑山区隧道的高湿高尘环境，优先选用防护等级高、故障率低的工业级监测仪器；二是加强现场监测人员的技术培训，使其熟练掌握多手段协同操作与数据初审技能；三是建设监测数据管理平台，实现从采集、传输、存储、分析到预警的全链条数字化闭环管理。此外，建议在工程合同中明确监测工作的独立性与权威性，赋予监测方在安全预警方面的直接叫停权限，从制度层面保障监测预警职能的有效履行。

结束语

山区高速公路隧道围岩变形监测是一项兼具技术复杂性与管理系统性的工作。本文在深入分析山区隧道围岩变形特征及监测需求的基础上，系统梳理了既有方案在测点布设、手段配置、信息反馈和预警机制等方面存在的主要问题，据此提出了以分区动态布设、多手段协同感知、智能数据处理和分级预警响应为核心的监测检测方案优化框架。优化方案的核心逻辑在于从“被动执行规范”转向“主动适配工况”，使监测工作真正成为围岩风险管控的灵敏触角与决策支撑。在后续研究中，可进一步探讨基于大数据与人工智能的围岩变形预测模型与监测方案的深度融合路径，以持续提升监测体系的信息化与智能化水平。

参考文献

[1] 王梦恕. 中国隧道及地下工程技术发展与展望 [J]. 隧道建设,2022,42(6):923-932.

[2] 李术才, 张庆松, 李利平, 等. 隧道围岩稳定性分析及监测预警技术研究进展 [J]. 岩土工程学报,2021,43(8):1379-1392.

[3] 陈卫忠, 谭贤君, 伍国军, 等. 深埋软岩隧道围岩变形控制理论与技术 [J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(11):2161-2173.

[4] 张顶立, 王臣, 房倩, 等. 隧道工程动态信息化施工监测技术 [J]. 中国公路学报,2021,34(3):1-18.