高速公路隧道施工技术及质量控制研究

刘 新

（四川公路桥梁建设集团有限公司机械化施工分公司，四川 成都 610200）

摘 要 高速公路建设逐步向山区复杂地形延伸，隧道工程占比持续提升，其施工质量直接关系到整条线路的运营安全与使用寿命。隧道施工受地质条件隐蔽、作业空间受限等因素制约，易出现围岩失稳、衬砌开裂、渗漏水等质量病害。本文围绕高速公路隧道施工技术与质量控制展开研究，梳理隧道施工管控难点，分析超前预报、开挖支护、防排水等关键施工技术，对应提出全过程质量控制措施，以期为同类隧道工程提升施工质量提供参考。

关键词 高速公路隧道；超前地质预报技术；隧道开挖；围岩支护；监控量测

中图分类号：U455.91 **文献标志码**：A DOI：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.015

0 引言

随着我国高速公路网向中西部山区延伸，长大隧道工程的建设规模与数量持续增长。隧道属于地下隐蔽工程，施工过程中面临地质条件多变、作业环境恶劣、工序交叉密集等挑战，若施工技术选用不当、质量管控缺位，易引发围岩塌方、衬砌强度不足、后期渗漏水等质量问题，既延误施工工期，也给后期运营留下安全隐患。当前部分隧道项目存在地质预判不充分、工序管控不精细、动态调整不及时等问题，质量管控的精细化程度仍有提升空间。因此，系统梳理隧道关键施工技术要点，构建全过程质量管控体系，对保障隧道施工安全、提升工程建设品质具有重要的工程意义。

1 高速公路隧道施工质量管控难点

隧道施工的特殊性决定了质量管控存在多方面现实难点。一是地质条件预判精度有限，前期勘察受勘探点位限制，无法完全掌握掌子面前方的岩体完整性与水文情况，施工中突发不良地质时，若技术方案调整不及时，极易引发围岩变形超标、塌方等质量安全问题。二是隐蔽工程质量追溯难度大，锚杆锚固深度、喷射混凝土密实度、防水板焊接质量等关键指标多为隐蔽状态，常规抽检难以全面覆盖，施工过程管控缺位易留下隐性质量隐患[1]。三是工序衔接对质量影响显著，隧道施工遵循“开挖—支护—衬砌”的流水作业逻辑，上一工序的质量偏差会直接传递到下一工序，例如开挖超欠挖会影响初期支护平整度，进而影响防水板铺设与二衬厚度，工序间的质量传递效应明显。四是施工扰动的质量影响具有滞后性，围岩变形、衬砌受力变化不会立刻显现，往往需要一段时间逐步发展，若监测不到位，难以及时发现质量劣化趋势，待病害显现时往往已造成较大影响。

2 高速公路隧道关键施工技术分析

2.1 超前地质预报技术

超前地质预报是应对复杂地质、规避施工风险的前置技术，通过提前探明掌子面前方的地质条件，为施工方案调整提供依据。常用预报技术分为三类：第一类是物探法，以 TSP 地震波反射法、地质雷达法为代表，通过发射地震波或电磁波，接收反射信号分析前方岩体完整性、断层位置与富水情况，适用于长距离超前预报，预报距离可达 100 m～150 m，可快速圈定异常地质区段。第二类是钻探法，采用超前水平钻机在掌子面钻进取芯，直接获取前方岩芯样本，直观判断岩体性质与含水情况，预报精度最高，适用于物探发现的异常区段验证，常规预报深度 30 m～50 m。第三类是地质素描法，由地质工程师对已开挖段的围岩岩性、节理裂隙、出水情况进行编录，结合地质资料推断前方地质情况，作为长距离预报的补充[2]。

实际施工中采用“长短结合、物探为主、钻探验证”的综合预报方案，长距离预报每 100 m 开展一次，圈定异常区域后用短距离钻探验证，既保障预报效率，也确保预报精度，为开挖与支护参数动态调整提供地质依据。

2.2 隧道开挖与出渣施工技术

隧道开挖遵循“新奥法”施工理念，根据围岩等级选用对应的开挖工法，最大限度减少对围岩的扰动。

作者简介：刘新（1996-），男，本科，助理工程师，研究方向：道路与桥梁工程。

对于Ⅰ级～Ⅱ级硬质围岩，采用全断面开挖法，配合光面爆破技术，一次成型整个开挖断面，施工效率高、工序少，爆破后围岩轮廓平整，超欠挖量小。对于Ⅲ级～Ⅳ级围岩，采用上下台阶法施工，将断面分为上下两个台阶分步开挖，上台阶超前下台阶一定距离，同步开展支护作业，兼顾施工安全与推进效率。对于Ⅴ级软弱围岩、断层破碎带区段，采用CD法或CRD法施工，将断面分隔为多个小分块分步开挖，每开挖一块及时施作封闭支护，控制围岩变形，避免塌方风险。

爆破施工采用光面爆破技术，周边眼采用小直径药卷间隔装药，严格控制装药量与起爆顺序，减少爆破对周边围岩的扰动，保障开挖轮廓圆顺，降低超欠挖量。出渣作业采用无轨运输模式，由装载机装渣、自卸汽车运渣，配合通风降尘设备快速排出洞内粉尘；长大隧道设置错车通道与卸渣平台，提升出渣效率，缩短单循环作业时间。不同围岩等级对应的开挖工法与支护参数存在明确差异，具体适配关系如表1所示。

表1 不同围岩等级开挖工法与支护参数对照表

围岩等级	推荐开挖工法	单循环进尺（单位：m）	初期支护组合形式（单位：cm）	二次衬砌设计厚度（单位：cm）
Ⅰ级～Ⅱ级	全断面法	2.5～3.0	素喷混凝土，厚8～10	30
Ⅲ级	正台阶法	1.5～2.0	砂浆锚杆+网喷混凝土，厚12	35
Ⅳ级	短台阶法	1.0～1.5	钢拱架+锚杆+网喷混凝土，厚20	40
Ⅴ级	CD法/CRD法	0.5～0.8	超前小导管+钢拱架+网喷混凝土，厚25	45

12 m，定位后加固牢固，防止浇筑时跑模、涨模。衬砌混凝土采用商品混凝土，通过泵送入模，分层对称浇筑，每层厚度不超过50 cm，配合插入式振捣棒振捣密实，避免出现蜂窝、麻面。浇筑完成后按规定时长养护，养护期不少于14天，保障混凝土强度稳定增长，减少干缩裂缝产生[3]。

2.4 隧道防排水施工技术

隧道防排水遵循“防、排、截、堵结合，因地制宜，综合治理”的原则，构建完整的防排水体系。防水体系以防水板为主要屏障，采用EVA或PVC防水板，铺设在初期支护与二次衬砌之间，铺设前先找平初期支护表面，切除外露钢筋头与尖锐凸起，防止刺破防水板。防水板采用无钉铺设工艺，用热熔垫片固定在初期支护上，板间搭接宽度不小于10 cm，采用双焊缝热焊机焊接，焊接完成后充气检测密封性，确保无渗漏点。

排水体系由环向排水盲管、纵向排水盲管与横向导水管构成，环向盲管沿初期支护表面环向布置，间距5 m～10 m，富水区段加密设置，收集围岩渗水后汇入纵向盲管，再通过横向导水管引入中心排水沟排出洞外。施工缝、沉降缝部位设置中埋式止水带与背贴式止水带，止水带居中安装、固定牢固，浇筑混凝土时避免移位，保障接缝部位防水效果。洞口段设置截水沟、排水沟，拦截地表水，避免雨水渗入隧道周边岩体，从源头减少洞内渗水量。

2.3 初期支护与二次衬砌施工技术

初期支护是隧道承载体系的重要组成部分，紧跟开挖作业施作，及时约束围岩变形。支护体系由锚杆、钢筋网、喷射混凝土、钢拱架组合构成，根据围岩等级调整参数组合。锚杆采用中空注浆锚杆，按梅花形布置，钻孔完成后插入锚杆并注入水泥浆，保障锚杆与围岩黏结牢固，充分发挥锚固作用。钢筋网采用φ6～φ8钢筋焊接而成，网格间距20×20 cm，铺设时搭接长度不小于一个网格，紧贴岩面固定。喷射混凝土采用湿喷工艺，按配比拌制好的混凝土通过湿喷机喷射到岩面，分层喷射至设计厚度，每层厚度5 cm～8 cm，保障混凝土密实度与平整度。软弱围岩区段增设钢拱架，采用工字钢或格栅钢架，按设计间距架设，拱脚落于坚实基础上，拱架间用纵向钢筋连接，形成整体受力体系。

二次衬砌在围岩变形基本稳定后施作，采用液压自行式模板台车作为成型模具，台车长度一般为9 m～

3 高速公路隧道施工全过程质量控制措施

3.1 地质预判与开挖环节质量管控

强化超前地质预报的管控力度，建立预报复核与动态调整机制。每段预报完成后出具正式预报报告，由设计、监理、施工三方共同研判地质情况，若发现与设计不符的不良地质，及时调整开挖工法与支护参数，避免盲目施工引发质量安全问题。重要断层、富水区段实行“有疑必探、先探后挖”，未经钻探验证不得贸然掘进。

严格控制开挖施工质量，推行光面爆破精细化管控。根据围岩岩性动态调整爆破参数，优化周边眼间距、装药量与起爆时差，减少爆破对围岩的扰动，将开挖轮廓的平均线性超挖量控制在 10 cm 以内，严禁出现欠挖。每循环开挖完成后，采用断面仪测量开挖断面，核对超欠挖情况，超挖过大的部位及时挂网喷平，欠挖部位彻底凿除，为后续支护施工提供规整的基面。出渣作业避免碰撞已施作的支护结构，防止初期支护受损开裂。

3.2 支护结构施工质量管控

从原材料与施工工艺两方面把控初期支护质量。支护原材料进场时查验质量证明文件，按批次抽检锚杆、钢筋、钢拱架的力学性能与喷射混凝土配合比，不合格材料严禁进场。锚杆施工严格控制钻孔深度、角度与注浆饱满度，注浆压力符合设计要求，每批次按比例做锚杆拉拔试验，确保锚固力达标。钢拱架安装控制间距、垂直度与拱脚标高，拱脚不得置于虚渣上，相邻拱架纵向连接筋焊接牢固，保障整体稳定性[4]。

喷射混凝土优先采用湿喷工艺，严格控制混凝土配合比与坍落度，喷射时喷头与岩面保持垂直，距离 0.8 m～1.2 m，螺旋式缓慢移动，确保混凝土密实无空洞。喷射厚度采用预埋标记点控制，完工后用钻孔或超声波测厚仪抽检，厚度不足的部位补喷至设计要求。二次衬砌施工前复核模板台车定位精度，检查模板平整度与密封性，浇筑过程对称均匀下料，防止台车偏移，振捣到位避免漏振，保障衬砌混凝土外观平整、内部密实。

3.3 防排水施工质量管控

将防排水作为隐蔽工程管控重点，实行逐层验收制度。防水板铺设前逐一检查初期支护基面，尖锐凸起全部打磨平顺，无外露钢筋头与尖锐岩块，基面平整度符合要求后方可铺板。防水板铺设松紧适度，预留一定松弛量，避免二衬浇筑时绷紧拉裂；板间焊接由持证操作工作业，焊接完成后逐段开展充气检测，压力下降超标部位补焊处理，确保焊缝密实。

止水带安装采用专用钢筋卡固定，位置居中、顺直无扭曲，接头采用热接工艺，搭接长度不小于 10 cm，严禁出现断裂、破损。排水盲管按设计间距布设，固定牢固，管身包裹透水土工布，防止泥沙堵塞管道；纵向盲管坡度符合设计要求，确保排水通畅。防排水设施施工完成后，由监理单位专项验收，留存影像资料与检测记录，验收合格后方可进行二衬浇筑，杜绝隐蔽缺陷遗留到后续工序[5]。

3.4 施工监测与动态质量管控

建立常态化施工监测体系，以监控量测数据指导施工，实现质量动态管控。必测项目包括洞内外观察、周边位移、拱顶下沉、地表沉降，选测项目包括围岩压力、支护内力、锚杆轴力等，根据隧道等级与围岩情况合理布设测点。监测频率根据位移速率与开挖距离动态调整，开挖初期每天监测 1 次～2 次，变形稳定后逐步降低频率，直至变形收敛。

指定专人负责监测数据整理分析，每日出具监测简报，当位移速率超标或出现异常变形时，立即发出预警，暂停掌子面掘进，分析原因并采取加强支护、回填注浆等处置措施，待变形稳定后再恢复施工。建立监测数据与设计参数的联动机制，根据实际围岩变形情况动态调整支护参数与开挖进尺，实现“动态设计、信息化施工”，既保障施工安全，也避免过度支护造成浪费。定期开展质量专项排查，针对支护、防排水、衬砌等关键工序开展月度专项检查，发现问题建立台账限期整改，形成管控闭环。

4 结束语

高速公路隧道施工质量管控是一项贯穿建设全程的系统性工作，需依托精细化的工序管控与动态化的方案调整保障工程品质。本文针对高速公路隧道施工技术与质量控制难点，从地质管控、支护管控、防排水管控、动态监测四个维度提出了全过程质量控制措施，为同类工程建设提供参考。未来可进一步融合 BIM 建模、智能监测与数字化管控技术，提升地质预判精度与质量管控效率，推动隧道施工向智能化、信息化方向升级。

参考文献：

[1] 丁齐军.高速公路隧道施工技术与质量控制研究[J].运输经理世界,2026(09):72-74.
[2] 段平.高速公路隧道施工技术质量控制措施研究[J].工程建设与设计,2026(03):167-169.
[3] 谢晴.高速公路隧道工程洞口施工关键技术分析[J].交通科技与管理,2025,06(23):149-151.
[4] 徐梦阳,严志航.探地雷达在隧道质量检测的应用分析[J].中国水运,2025(22):137-139.
[5] 吕旭铭.高速公路隧道衬砌结构质量检测与控制[J].汽车周刊,2025(12):186-188.