山区高速隧道软弱围岩段开挖支护施工技术应用

李 超

（四川西香高速建设开发有限公司，四川 西昌 615000）

摘 要 针对山区高速隧道软弱围岩自稳差、变形快、易坍塌的特点，本文坚持“管超前、严注浆、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”原则，阐述超前地质预报、管棚与小导管注浆预支护、三台阶七步及中隔壁法分步开挖、湿喷钢拱架初支、径向注浆堵水、仰拱二衬适时封闭等技术，建立预报与量测联动、按变形反馈动态调整工法参数的信息化机制。结果表明，该技术可控制围岩变形、加快支护成环、稳定掌子面，为同类工程提供借鉴。

关键词 山区高速隧道；软弱围岩；分步开挖；超前支护；初期支护

中图分类号：U455.4 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.019

0 引言

山区高速隧道常穿越断层破碎带、强风化层和松散堆积体，洞口多浅埋偏压，围岩自稳时间短、变形快，工法不当或封闭不及时易发生掌子面失稳、拱顶坍塌和侵限。施工中需以超前预支护改善围岩、分步开挖控制临空面、强初支早封闭约束变形，依靠量测动态调整。随着机械化、信息化应用，开挖支护逐渐由经验组织向预报、开挖、支护、量测闭环转变。因此，研究山区高速隧道软弱围岩段开挖支护施工技术，对保障施工安全、控制质量、提升隧道建造水平具有现实意义。

1 山区高速隧道软弱围岩段工程特点与施工原则

1.1 软弱围岩工程特性与变形特征

山区高速隧道软弱围岩多为Ⅴ级、Ⅳ级围岩，岩性以泥岩、页岩、千枚岩、断层角砾和松散坡积土为主，具有强度低、完整性差、遇水软化、流变明显等特征。受构造挤压和风化作用影响，节理裂隙发育、岩体破碎，部分段落富含地下水，开挖后地下水沿裂隙渗出甚至涌水，进一步降低结构面抗剪强度，使围岩自承能力显著下降。洞口浅埋、偏压段覆盖层薄，地表沉降易向洞内传导，施工扰动后更易发生开裂和滑塌[1]。

从变形特征看，软弱围岩开挖后应力释放快，表现为拱顶下沉量大、周边收敛持续时间长、掌子面挤出和底鼓明显，变形具有明显的时间效应和空间效应：开挖通过初期变形速率高，若初期支护不能及时封闭成环，变形会持续累积并可能出现钢拱架扭曲、喷层开裂乃至坍塌。围岩变形同时受开挖步序、循环进尺、支护时机和地下水影响，参数之间相互耦合。这就要求施工不能沿用硬岩隧道“大进尺、强爆破、后支护”的做法，而应把围岩作为支护体系的一部分，及时约束、主动加固，充分发挥其自承能力[2]。

1.2 开挖支护总体原则

软弱围岩段施工遵循“管超前、严注浆、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”的原则。管超前，是在开挖前以管棚、超前小导管等对掌子面前方围岩预支护，形成承载拱；严注浆，是通过超前和径向注浆充填裂隙、固结松散体并堵截地下水；短进尺，是缩小开挖循环进尺、减少单次临空面暴露时间；强支护，是采用喷射混凝土、钢拱架、锚杆（管）和钢筋网组成刚度足够的初期支护；早封闭，是使初支尽快仰拱落底、封闭成环；勤量测，是通过连续监测掌握变形、指导施工。

2 山区高速隧道软弱围岩段开挖支护施工技术

2.1 超前地质预报与围岩级别动态确认

超前地质预报是软弱围岩动态施工的前提，采用长中短距离相结合、物探与钻探相结合的方式。长距离以弹性波反射法（TSP）探测前方断层、破碎带和岩性界面的位置与规模，中短距离以地质雷达识别掌子面前方松散体、空洞和富水区，对异常部位辅以超前水平钻探取芯和孔内出水观测，直观确认岩体状况；每班由技术人员开展掌子面地质素描，记录岩性、产状、出水和掉块情况[3]。

作者简介：李超（1990-），男，本科，工程师，研究方向：道路与桥梁（隧道工程）。

各类预报成果相互印证、综合判释，形成前方地质条带图和风险提示，用于动态确认围岩级别并预先调整开挖工法、循环进尺和支护参数。当预报揭示断层破碎带、涌水或围岩级别降低时，提前加密超前支护、缩短进尺、增设临时支护并备好排水和注浆设备；围岩条件好于预期时，按程序优化支护参数。通过把地质预报纳入工序管理，做到“先探后掘、不探不掘”，避免盲目开挖诱发掌子面失稳，为开挖支护方案的动态调整提供可靠依据。

2.2 超前预支护与注浆加固

超前管棚适用于洞口浅埋、偏压和断层破碎带等自稳能力极差的段落。管棚沿开挖轮廓线外缘按设计外插角打设，钢管分段连接、棚护范围跨过不稳定段，钢管内注浆并与洞口套拱及钢拱架连成整体，形成沿纵向承载的“伞状”防护，承担上部松散荷载、限制坍塌发展。管棚施工控制钻孔角度和搭接长度，防止侵限和棚护空档，注浆采用水泥浆或水泥水玻璃双液浆，按先无水后有水、由下而上的顺序施注并检查固结效果。

洞内一般软弱围岩段采用超前小导管注浆，小导管沿拱部周边按设计环向间距和外插角打设，前端加工成锥形并钻设溢浆孔，尾部与钢拱架焊接，注浆压力和注浆量双控，使浆液在围岩中扩散胶结，形成具有一定厚度的加固圈。对裂隙水发育、掌子面不稳的部位，配合掌子面喷射混凝土封闭、局部超前玻璃纤维锚杆和洞内周边帷幕注浆，先堵水加固后开挖。注浆结束后按设计检查注浆量、压力、涌水量和加固体强度，必要时补注浆，确保前方围岩在开挖时具备短期自稳能力。

2.3 分步开挖工法与循环控制

软弱围岩段以分部开挖、快速支护为基本要求，根据断面跨度和围岩稳定性选择工法。围岩稍好的Ⅳ级段采用台阶法，上、中、下台阶错开推进，台阶长度满足机械作业又不过长；Ⅴ级及破碎富水段采用三台阶七步开挖法，将断面分为环形拱部、中部和下部多个开挖面，弧形导坑先护拱、两侧交错落中槽、及时接长钢拱架并施作仰拱，使支护尽早成环；对大跨、浅埋和变形难以控制的地段，采用中隔壁法或交叉中隔壁法，以临时中隔墙和仰拱分割断面、控制沉降[4]。

开挖坚持短进尺、弱扰动，循环进尺与一榀或两榀钢拱架间距相匹配，一般控制在0.5 m～1.0 m，开挖后立即初喷封闭、架立钢拱架、施作锁脚锚管（杆）并复喷至设计厚度。机械开挖为主，采用挖掘机配合破碎锤修边，尽量减少爆破；确需爆破时采用光面爆破、小药量、短进尺，降低对围岩和已作支护的振动。开挖轮廓预留足够的变形量和支护沉降量，避免变形侵限；上台阶中部保留适量土体支挡掌子面，随开挖随清除。各开挖面保持合理步距、平行流水，仰拱紧跟下台阶及早封闭成环，缩短围岩暴露和支护未闭合的时间。

2.4 出渣、防排水与作业组织

软弱围岩段出渣与开挖支护紧密衔接，上台阶采用挖掘机扒渣、装载机配合自卸车运输，减少掌子面存渣和机械对初支的碰撞；仰拱施工采用自行式移动栈桥，保证出渣车辆通行的同时在栈桥下方连续施作仰拱和填充，解决仰拱施工与运输干扰，加快封闭成环速度。洞内道路保持平整、排水通畅，富水段设置集水井和水泵分级抽排，防止积水浸泡拱脚和基底引起软化、沉降。

作业组织推行机械化配套和标准化循环，将超前支护、开挖、出渣、初支、量测纳入循环作业图表，明确各工序用时和衔接条件，做到支护不到位不进入下一循环、量测数据异常不盲目掘进。加强通风、照明和用电管理，对涌水、掉块和变形地段设置专人巡查。通过紧凑有序的组织，把每循环围岩暴露时间压缩到较短范围，使超前支护、开挖和初期支护形成连续、稳定的作业节拍，为控制软弱围岩变形创造条件。

3 支护施工与变形控制技术

3.1 初期支护快速施作与封闭成环

初期支护是约束软弱围岩变形的主要承载结构，由喷射混凝土、钢拱架、系统锚杆（锁脚锚管）和钢筋网组成，开挖后及时施作、快速闭合。喷射混凝土采用湿喷工艺和湿喷机械手，先对岩面初喷一层封闭，再在出渣、架立钢拱架后复喷至设计厚度；湿喷混凝土回弹少、匀质性好、早期强度高，掺加速凝剂后迅速与围岩密贴，及时提供支护抗力。钢拱架按设计间距架立，连接板螺栓连接、纵向钢筋拉结，拱脚置于稳固基础上并设置垫板，防止下沉[5]。

锁脚锚管（杆）是控制拱架下沉和收敛的重要环节，在各台阶拱脚处按设计角度打设并与钢拱架可靠焊接、注浆固结，把拱架荷载传入深部稳定岩体；系统锚杆按梅花形布置，破碎段以中空注浆锚杆替代，注浆后兼具加固和锚固作用。钢筋网随岩面起伏铺设、搭接牢固，与钢拱架和喷层形成整体。施工中重点控制初喷及时性、钢拱架垂直度和连接质量、锁脚锚管角度

以及喷层厚度，仰拱初期支护紧跟开挖落底，使整个初期支护尽早封闭成环，发挥封闭结构的承载能力。

3.2 径向注浆加固与地下水处治

对初期支护完成后仍存在渗漏水、围岩松弛或变形偏大的地段，实施径向注浆加固。径向注浆管（锚杆）通过初支或在开挖轮廓外按设计孔位、深度和间距打设，浆液充填围岩裂隙、固结松弛圈，并在初支背后形成止水固结层，减小地下水对围岩的软化和对支护的压力。注浆根据水量选择水泥浆或双液浆，分段分级控制压力，防止压力过高击穿掌子面或造成初支变形，注浆过程中观察支护和出水变化，做好记录。

地下水处治坚持“防、排、堵、截相结合，因地制宜、综合治理”。掌子面涌水采用超前帷幕或局部注浆封堵，集中出水点设置引流管将水导入洞内排水系统，避免直接冲刷喷层和作业面；初支与二衬之间铺设防水板和无纺布、按设计布设环纵向盲管与排水边沟，形成可靠的防排水体系。注浆效果通过检查孔涌水量、取芯固结情况和压水试验评定，未达要求补注浆。通过加固与堵水并举，改善围岩力学条件，降低富水软弱围岩段的变形和渗漏风险。

3.3 仰拱与二次衬砌适时施作

仰拱是支护结构封闭成环、控制底鼓和整体沉降的关键，应紧跟下台阶施作，做到“仰拱先行、尽早闭合”。仰拱开挖控制超挖和对拱脚的扰动，虚渣、积水清除干净后浇筑混凝土，仰拱与填充分层施作并按设计设置钢筋，仰拱接头与边墙初期支护顺接。利用移动栈桥实现仰拱连续施工和车辆正常通行，保证仰拱与掌子面、二次衬砌之间的安全步距，避免步距过大导致初支长期开口、变形累积。

二次衬砌是安全储备和防水承载结构，其施作时机由监控量测确定：当拱顶下沉、周边收敛速率明显减小并趋于稳定、位移达到预计总量的规定比例，且初期支护表面裂缝不再发展时施作二衬。衬砌采用全断面液压台车整体浇筑，混凝土对称、分层、连续入模，加强振捣和拱顶带模注浆，保证背后密实、无空洞；二衬钢筋、防排水板和施工缝、变形缝止水带按规范安装。软弱围岩段二衬适度紧跟，与仰拱、初支共同形成长期稳定的支护体系，既不盲目抢工造成开裂，也不过度滞后削弱安全储备。

3.4 监控量测与信息化动态施工

监控量测贯穿软弱围岩段施工全过程，分为必测项目和选测项目。必测项目包括洞内观察、拱顶下沉、周边收敛和洞口浅埋段地表沉降，按规定断面和频次观测，开挖后及时读取初始值；选测项目包括围岩内部位移、围岩与初支接触压力、钢拱架应力、锚杆轴力和二衬接触压力等，用于判断支护受力状态。测点埋设牢固、标识清晰，爆破和出渣后加强保护，保证数据连续。

量测数据及时整理，绘制位移时态曲线和速率曲线，采用回归分析预测最终位移，对照变形管理等级和预警值实施动态控制：变形速率正常时按既定参数施工；接近预警值时加密观测、减缓进尺、补强支护；超过控制值或出现异常加速时，立即停工撤人，采取增设临时仰拱或横撑、补打锚杆注浆、提前封闭仰拱等措施，待变形回稳后复工。在此基础上推行自动化、无线传输监测，在典型断面安装固定式测斜、收敛和应力传感器，数据实时上传信息化平台并与超前地质预报、开挖进度和支护参数关联，结合三维模型展示变形分布和发展趋势，实现“预报—开挖—支护—量测—反馈”的闭环管理，使软弱围岩施工由经验判断转向数据驱动、动态决策。对长大软弱围岩段，可将监测数据接入数字孪生平台，与三维地质模型和开挖进度关联，以云图展示变形与受力分布，辅助工法切换和资源调度，推动施工由被动处置向主动预判转变。

4 结束语

本文阐明软弱围岩低强、破碎、变形快、自稳差特征，确立“管超前、严注浆、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”原则，总结预报定级、管棚小导管预支护、三台阶七步、中隔壁开挖、湿喷钢拱架、锁脚锚管强初支、注浆堵水、仰拱先行、二衬封闭、量测预警技术，提出以预报探明条件、分部开挖控扰动、封闭约束变形、量测指导调整，保持掌子面、围岩稳定，抑制坍塌。未来需深化自动监测与工况关联，发展变形预测与机械化软岩工法，提升数字化水平。

参考文献：

[1] 覃群 . 软弱围岩条件下桥隧过渡段支护结构施工技术 [J]. 西部交通科技 ,2026(06):133-135.
[2] 朱泽豪 . 高速公路特长隧道初期支护施工技术与质量控制 [J]. 工程技术研究 ,2026,11(12):147-149.
[3] 郝江 . 软弱围岩公路隧道施工变形与控制技术 [J]. 交通世界 ,2026(18):145-147,151.
[4] 李港回 . 基于大跨度软弱围岩的高速公路隧道施工技术 [J]. 工程技术研究 ,2026,11(11):76-78.
[5] 覃钊泽 . 山区公路隧道施工安全风险识别与动态控制技术研究 [J]. 运输经理世界 ,2026(16):89-91.