

隧道施工技术及安全控制研究—以石棉隧道为例

吴季洪 石银磊*

四川泸石高速公路有限责任公司, 中国·四川 雅安 625000

摘要: 随着我国交通基础设施建设向山区延伸, 深切河谷、复杂地质条件下的特长隧道施工难度不断提升。石棉隧道作为川西南高山区的重要交通节点, 具有线路长、埋深大、地质条件复杂、临近活动性断裂等特点, 施工过程中面临围岩稳定性控制、不良地质应对、施工安全保障等诸多难题。本文以石棉隧道为例, 结合其地形地貌、地层岩性、地质构造等工程地质条件, 系统研究了隧道进出口施工、洞身开挖、支护加固、防排水及施工安全控制等关键技术, 解决了复杂地质条件下特长隧道施工的技术难点, 为同类山区隧道施工提供理论参考和工程借鉴。

关键词: 复杂地质; 隧道施工; 支护加固

Research on Tunnel Construction Technology and Safety Control: A Case Study of the Shimian Tunnel

Wu Jihong, Shi Yinlei*

Sichuan Lushi Expressway Co., Ltd., China Sichuan Ya'an 625000

Abstract: As China's transportation infrastructure extends into mountainous regions, the construction of extra-long tunnels in deep river valleys and complex geological conditions has become increasingly challenging. The Shiman Tunnel, a critical transportation node in the high-altitude areas of southwestern Sichuan, features a long route, significant burial depth, complex geological conditions, and proximity to active faults, presenting numerous challenges during construction—including controlling surrounding rock stability, addressing unfavorable geological conditions, and ensuring construction safety. Using the Shiman Tunnel as a case study and incorporating its engineering geological characteristics such as topography, stratigraphic lithology, and geological structures, this paper systematically examines key technologies for tunnel entrance/exit construction, tunnel excavation, support reinforcement, drainage systems, and construction safety management. The study overcomes technical difficulties in constructing extra-long tunnels under complex geological conditions, providing theoretical insights and practical references for similar mountain tunnel projects.

Keywords: Complex geology; Tunnel construction; Support and reinforcement

0 引言

川西南高山区地处青藏高原东南缘向四川盆地过渡地带, 地形起伏剧烈、河谷深切、地质构造复杂, 是交通建设的重点与难点区域, 该区域隧道建设常面临高地应力、复杂地层等不利因素, 易引发各类施工灾害。石棉隧道作为该区域重要交通通道, 左线长 3684m、右线长 3718m, 最大埋深 488m, 穿越多种地层且临近大凉山活动性断裂、地处Ⅷ度强震区, 施工难度极大。开展其施工技术及安全控制研究, 既能解决实际施工难题、保障工程推进, 也能为同类隧道提供技术支撑, 具有重要意义。国内虽在山区特长隧道施工技术上取得进步, 但川西南高山区同类隧道施工经验仍不足, 相关研究需进一步深入。本文以石棉隧道为实例, 围绕工程地质分析、开挖工法优化、支护加固、防排水设计、安全控制及监测验证等内容展开研究, 技术

路线为通过资料查阅与现场勘察明确难点, 设计优化施工方案, 现场施工监测后验证方案合理性并总结成果。

1 石棉隧道工程概况及地质条件分析

1.1 工程概况

石棉隧道位于四川省石棉县境内, 地处青藏高原东南缘向四川盆地过渡之川西南高山区中部, 是某高速公路的关键控制工程^[1]。隧道为双洞单向行驶隧道, 左线起止桩号为 ZK91+848~ZK95+532, 全长 3684m; 右线起止桩号为 K91+845~K95+563, 全长 3718m。隧道进口高程 910.49m (左线)、910.15m (右线), 出口高程 946.84m (左线)、946.81m (右线), 隧道纵坡均为 1.00‰, 最大埋深 467m (左线)、488m (右线)。隧道设计车速 80km/h, 净宽 11.0m, 净高 5.0m, 采用双向四车道标准建设。石棉隧道规模参数详见表 1。

表1 石棉隧道规模表 单位：m

序号	隧道名称	线别	起止桩号	隧道长度（m）	进口高程（m）	出口高程（m）	最大埋深（m）	隧道纵坡
1	石棉隧道	左线	ZK91+848～ZK95+532	3684	910.49	946.84	467	1.00/3684.00
2		右线	K91+845～K95+563	3718	910.15	946.81	488	1.00/3718.00

1.2 工程地质条件分析

石棉隧道地处川西南高山区中部，属构造侵蚀中山地貌，地势西高东低、北高南低，山势巍峨、河谷深切，海拔 850～2500m，周边有贡嘎山、马鞍山等高山，受区域构造控制呈“构造地貌”特征，第四纪山岳冰川活动痕迹明显，进出口位于斜坡下部，给进洞施工带来难度。场地内主要地层从新到老为第四系全新统崩坡积层、冲洪积层、泥石流堆积层及元古界早震旦系花岗岩，其中花岗岩分布广泛，有辉绿岩岩脉侵入，风化带较厚。场区位于构造结合部，形成“Y”字形构造格局，主要受大凉山活动性隐伏断裂影响，节理裂隙发育，降低了岩体完整性。区内地下水主要为松散堆积层孔隙水和基岩裂隙水，大渡河河水对混凝土具弱腐蚀性^[2]。不良地质及特殊岩土方面，场区属Ⅷ度强震区，花岗岩放射性符合规范要求，整体无岩爆风险，进口下方翻身沟有泥石流，需防范其对施工便道的破坏，这些地质条件共同构成了隧道施工的主要地质背景。

1.3 施工难点分析

结合石棉隧道的工程地质条件，其施工过程中主要面临以下难点：

- (1) 围岩稳定性控制难度大：隧道穿越崩坡积层、冲洪积层等松散地层及花岗岩强风化带，岩体完整性差，透水性好，易发生坍塌；同时，临近大凉山活动性断裂，构造扰动明显，进一步降低了围岩稳定性。
- (2) 进出口施工难度大：进出口位于斜坡下部，斜坡坡度 35～45°，覆盖层以块石土为主，厚度 5～40m，岩土界面倾角与横坡坡度相似，易发生边坡失稳，进洞施工风险高。
- (3) 防排水要求高：场地水对混凝土结构具弱腐蚀性，且基岩裂隙水分布不均，若防排水措施不到位，易引发隧道渗漏水，影响工程质量和运营安全。
- (4) 施工安全风险高：场区为Ⅷ度强震区，临近活动性断裂，易发生地震诱发的施工灾害；同时，隧道埋深大、线路长，施工过程中面临通风、粉尘、噪声等职业健康风险。

2 石棉隧道施工技术方案

2.1 进出口施工技术

石棉隧道进出口均位于斜坡下部，覆盖层较厚、边坡稳定性差，进洞施工采用“边坡预加固 + 超前支护 + 短

进尺开挖”的技术方案。边坡预加固采用锚杆 + 挂网喷混凝土，锚杆为 Φ22 螺纹钢（3～5m 长，1.5×1.5m 梅花形布置），挂网为 Φ8 钢筋网（20×20cm 网格），喷 C25 混凝土（厚度 10cm）。超前支护差异化设计，进口采用 Φ42 无缝钢管小导管（4.5m 长，间距 40cm，外插角 10～15°，0.5～1.0MPa 水泥浆注浆）；出口采用 Φ108 无缝钢管管棚（12m 长，间距 50cm，外插角 5～10°，1.0～1.5MPa 注浆）。开挖采用台阶法，上台阶高 3.5m、下台阶高 2.5m，进尺控制在 0.5～1.0m/ 循环，浅孔爆破减少围岩扰动，开挖后及时初期支护，确保围岩封闭。

2.2 洞身开挖工法选择

根据石棉隧道不同段落的地质条件，结合隧道断面尺寸，选择不同的开挖工法：

- (1) 松散地层段（崩坡积层、冲洪积层、泥石流堆积层）：该段落岩体松散，透水性好，稳定性差，采用 CRD 法（交叉中隔壁法）开挖，将隧道断面分为四个部分，分步开挖、分步支护，缩短围岩暴露时间，控制围岩变形。
- (2) 花岗岩强风化带段：岩体完整性较差，风化程度高，采用台阶法开挖，上台阶采用环形开挖留核心土，下台阶分段开挖，确保开挖过程中围岩稳定。
- (3) 花岗岩弱风化～微风化带段：岩体完整性好，强度高，采用全断面开挖，提高施工效率，开挖进尺控制在 2.0～3.0m/ 循环。
- (4) 断裂带附近段：受构造扰动影响，岩体破碎，采用 CD 法（中隔壁法）开挖，设置中隔壁墙，分隔隧道断面，减少围岩扰动，防止围岩坍塌。

2.3 支护加固技术方案

石棉隧道支护遵循“分级支护、按需加固”原则，分为初期支护、二次衬砌，围岩极差段落增设辅助加固措施。初期支护紧跟开挖面施工，不同地层采用差异化参数，锚杆为药卷锚杆、喷混凝土采用湿喷工艺，钢拱架与锚杆、钢筋网连接牢固形成整体。二次衬砌采用 C30 模筑混凝土，按地层不同厚度设为 30-50cm，采用整体钢模板台车施工，施工时机依据围岩变形监测数据确定，施工前需清理浮渣、设置防水层。辅助加固针对断裂带核心区等段落，采用 Φ42 无缝钢管径向注浆和 Φ25 螺纹钢锁脚锚杆，分别用于提高围岩整体性和防止钢拱架下沉变形，保障支护

表2 不同地层初期支护参数表

地层类型	锚杆规格及布置	钢筋网规格	喷混凝土	钢拱架规格及间距
松散地层段	Φ22螺纹钢, 4.5m, 1.0×1.0m梅花形	Φ8, 20×20cm	C25, 15cm	I20b型钢, 0.6m
花岗岩强风化带	Φ22螺纹钢, 4.0m, 1.2×1.2m梅花形	Φ8, 20×20cm	C25, 12cm	I18型钢, 0.8m
花岗岩弱风化~微风化带	Φ20螺纹钢, 3.5m, 1.5×1.5m梅花形	Φ8, 25×25cm	C25, 10cm	I16型钢, 1.2m
断裂带附近	Φ25螺纹钢, 5.0m, 0.8×0.8m梅花形	Φ8, 15×15cm	C25, 18cm	I22b型钢, 0.5m

可靠性, 见表 2。

2.4 防排水施工技术

石棉隧道防排水遵循“防、排、截、堵相结合, 因地制宜, 综合治理”原则, 构建完善防排水体系。防水方面, 初期支护与二次衬砌间设 1.5mm 厚 EVA 防水板+300g/ m²土工布, 施工缝、变形缝采用双重防水, 二次衬砌混凝土掺入阻锈剂应对水的弱腐蚀性。排水方面, 洞内布设纵、环、横向 HDPE 排水盲管形成网络, 进出口设截水沟和排水沟, 基岩裂隙水发育段增设排水盲沟, 有效排出积水、减少衬砌压力, 防止渗漏水及腐蚀破坏。

3 石棉隧道施工安全控制措施

3.1 分类型安全控制措施

围岩稳定性控制方面, 加强洞内监测, 每 5~10m 设沉降、水平位移等观测点, 用全站仪等设备定期监测, 松散地层及断裂带每日 1 次、稳定地层每 3 日 1 次, 变形超允许范围立即停工加固; 严格按工法和参数施工, 及时初期支护, 不稳定段落减小进尺并加强超前支护, 定期检查整改支护结构隐患。强震区控制结合Ⅷ度烈度优化支护参数, 建立地震预警机制, 配备应急物资并定期演练, 洞口边仰坡加强支护、增设抗滑措施。职业健康控制成立保障小组, 设医务所并配备劳保用品, 改善作业环境减少粉尘噪声, 联动卫生防疫部门做好防病工作。其他安全控制严格遵循爆破规程, 做好用电防护, 加强花岗岩放射性监测, 及时处置超标情况, 全方位保障施工安全。

3.2 应急管理

制定完善的应急预案^[3], 包括围岩坍塌应急预案、突水突泥应急预案、地震应急预案、触电应急预案、火灾应急预案等, 明确应急组织机构、应急响应流程、应急处置措施和应急物资保障。

配备充足的应急物资, 包括应急照明、应急通讯设备、急救药品、担架、灭火器、抽水设备、加固材料等, 定期对急救物资进行检查和维护, 确保应急时能够正常

使用。

定期开展应急演练, 每季度至少开展一次综合应急演练, 针对不同类型的突发事件, 开展专项应急演练, 提高施工人员的应急处置能力和协同配合能力, 确保突发事件发生时能够及时、有效地进行处置, 减少人员伤亡和财产损失。

4 结语

本文以石棉隧道为实例, 结合其复杂地质条件, 系统研究了施工技术及安全控制措施, 得出结论如下: 该隧道地处川西南高山区, 临近活动性断裂且属Ⅷ度强震区, 施工难点集中在围岩稳定、进出口施工等方面。针对不同地层选用适配开挖工法并优化参数, 遵循“分级支护、按需加固”原则构建完善支护体系, 采用“防排截堵结合”模式解决渗漏水问题, 建立健全安全控制体系及应急预案。经全过程监测验证, 所用施工技术及安全措施合理有效, 实现了隧道安全高效施工。

参考文献:

[1] 钟焱宇, 刘太亮, 冉小松等. 泸定地震区公路隧道不良地质评价与防治措施研究[J]. 科技资讯, 2025, 23(12): 214-217.

[2] 陈兴亮, 毛艳艳, 乔吉平等. 李仙江石门坎水电站枢纽设计综述[J]. 云南水力发电, 2011, 27(06): 53-56.

[3] 庄永强, 谢智潮, 陈少华. “代建+监理”一体化建设管理制度体系架构与探讨[C]// 中国交通建设监理协会 2022 年度学术论文集. 福建路信交通建设监理有限公司, 2023: 7-12.

作者简介: 吴季洪 (1997.12-), 男, 汉族, 四川广元, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 高速公路建设(道路、桥梁、隧道等)。

* 通讯作者: 石银磊 (1996.09-), 男, 汉族, 河南省周口市, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 主要从事高速公路修建、研究。