

强震区公路隧道软岩大变形防控施工技术

朱 健

(四川公路桥梁建设集团有限公司公路隧道分公司, 四川 成都 610200)

摘 要 强震区岩体受地震作用产生结构性损伤, 公路隧道穿越软岩地层时极易发生大变形灾害, 引发支护侵限、钢架扭曲、拱顶坍塌等安全事故。本文依托川西北强震区大店隧道工程, 分析了强震区软岩大变形的核心发生机理, 明确了“超前预控、弱扰快封、强支控变、动态适配”的防控原则, 从开挖工法优化、分级支护体系、围岩改良、监测预警四个维度阐述了核心防控施工技术, 以为强震区同类隧道软岩大变形防控提供工程实践参考。

关键词 强震区; 公路隧道; 软岩大变形; 防控施工; 动态监测

中图分类号: U455.49

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.013

0 引言

我国西南强震区地质环境复杂, 受历史强震影响, 岩体节理裂隙发育、结构完整性差, 隧道穿越软岩地层时, 大变形灾害已成为制约施工安全与进度的核心难题。软岩大变形易引发初期支护开裂、断面侵限甚至拱顶坍塌等事故, 传统隧道施工工法难以适配强震区破碎软岩的工程特性。本文依托川汶高速大店隧道工程, 针对强震区软岩隧道大变形防控关键技术展开系统研究, 结合工程实践提出成套施工管控措施, 以为强震区同类隧道工程建设提供技术参考。

1 工程概况

1.1 项目基本情况

大店隧道位于四川省阿坝州茂县境内, 地处汶川地震强影响区, 是川汶高速 TJ9 标段的控制性工程。隧道设计为双向四车道公路隧道, 地震动峰值加速度为 0.20 g , 对应地震基本烈度Ⅷ度, 属于典型强震区公路隧道工程。

隧道施工采用上下台阶预留核心土法为主的施工工法, 内容涵盖洞身开挖、超前支护、初期支护、仰拱与二次衬砌、防排水系统施工等全流程工序。隧道全长范围内Ⅳ、Ⅴ级软岩围岩段占比超 60%, 穿越多条断层破碎带, 施工过程中面临软岩大变形、突泥涌水、围岩坍塌、微瓦斯防控等多重风险, 工程施工难度与安全管控要求极高。

1.2 工程地质与水文特征

隧道穿越地层以千枚岩、板岩为主, 受历史强震影响, 岩体呈碎裂—散体结构, 节理裂隙极度发育,

围岩完整性差、单轴抗压强度低, 具有显著的流变特性, 开挖后围岩应力释放快, 易产生持续的塑性大变形。

隧道区地下水以基岩裂隙水为主, 局部断层破碎带存在富水区, 地下水对软岩地层具有强烈的软化、泥化作用, 会进一步劣化围岩力学性能, 加剧大变形发展。同时隧道局部段落为微瓦斯地层, 施工过程中需兼顾瓦斯防控与变形管控双重要求, 对施工组织与技术管控提出了严格要求。

2 强震区软岩大变形机理与防控原则

2.1 强震区软岩大变形发生机理

结合本工程地质特征与强震区工程特性, 隧道软岩大变形是地质内因与施工外因共同作用的结果, 核心发生机理可归纳为四个方面:

第一, 地震作用造成岩体先天结构损伤^[1]。强震产生的地震波使岩体内部形成大量张拉裂隙, 原有结构面被贯通, 围岩完整性与整体强度大幅劣化, 即使是硬质岩也呈现出软岩的力学特性, 开挖后应力释放速率快、变形持续时间长, 是大变形发生的先天地质基础^[2]。

第二, 软岩本身的流变与遇水膨胀特性。隧道穿越的千枚岩、板岩属于典型层状软岩, 具有显著的蠕变特性, 在围岩应力重分布过程中会产生持续的塑性变形; 同时地下水侵入后, 岩层遇水膨胀、软化, 围岩内摩擦角与黏聚力快速下降, 进一步扩大变形量与变形持续时间。

第三, 开挖扰动引发的围岩应力重分布。隧道开挖打破了原岩应力平衡, 洞周形成塑性屈服区, 强震

作者简介: 朱健(1989-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

破碎围岩的自稳能力极差，若支护不及时、支护刚度不足，围岩塑性区会持续向深部扩展，最终引发大变形甚至洞室失稳坍塌。

第四，施工工法与支护体系适配性不足。若开挖进尺过大、爆破扰动强烈，会进一步破坏围岩稳定性；而锁脚锚杆失效、钢架连接不牢、喷射混凝土不密实等支护缺陷，会导致支护体系无法有效约束围岩变形，最终引发变形侵限、支护结构破坏^[3]。

2.2 强震区软岩大变形防控原则

1. 超前预控原则。坚持“地质先行、预报前置”，通过 TSP、地质雷达、超前水平钻探等综合超前地质预报手段，提前探明前方围岩地质与水文条件，采用超前小导管、帷幕注浆等措施对围岩进行预加固，从源头提升围岩自稳能力，降低大变形发生概率。

2. 强支控变原则。构建“锚杆+钢架+钢筋网+喷射混凝土”的联合支护体系，重点强化锁脚锚管与钢架的连接性能，提升支护体系整体刚度与承载能力，通过分级支护参数适配不同等级的围岩变形风险。

3 软岩大变形防控关键施工技术

3.1 超前预加固与开挖工法优化

超前预加固是控制软岩大变形的第一道防线，本工程针对不同围岩条件采用分级超前预加固措施：对于一般Ⅳ级软岩段，采用 Φ42 mm 超前小导管预支护，

小导管长度 4.5 m，环向间距 40 cm，外插角 5°～12°，注浆采用水泥—水玻璃双液浆，灰水比 0.6～0.8，在隧道开挖轮廓外形成稳定的围岩承载拱；对于断层破碎带、节理密集区等Ⅴ级围岩大变形高风险段，采用双层小导管预支护，进一步扩大围岩加固范围，提升预支护效果^[4]。

开挖工法直接决定围岩扰动程度，本工程摒弃全断面开挖工法，采用上下台阶预留核心土法施工，严格控制开挖进尺与台阶参数：Ⅳ级围岩上台阶每循环开挖进尺不大于 3 榀钢架间距，Ⅴ级围岩不大于 2 榀钢架间距，利用核心土约束掌子面挤出变形。上台阶开挖完成后立即开展初期支护，待喷射混凝土强度达到设计强度，方可开展下台阶与核心土开挖。

下台阶采用左右侧错开开挖，避免一次性全断面开挖导致围岩失稳，开挖进尺控制在 3 榀钢架间距以内，最大限度减小对围岩的扰动。同时采用预裂光面爆破技术，优化炮眼布置与装药参数，坚持“多打眼、少装药”的弱爆破原则，减少爆破对围岩的损伤，严格控制隧道超欠挖，避免围岩应力集中引发的变形加剧。

3.2 分级强化初期支护体系

初期支护是控制软岩大变形的核心载体，本工程结合围岩变形风险等级，构建了分级强化的初期支护体系，核心支护参数见表 1。

表 1 强震区软岩隧道分级支护参数表

围岩等级	钢架型号	钢架间距 /m	喷射混凝土设计厚度 /mm	系统锚杆参数	锁脚锚管参数
Ⅳ级	I20b 工字钢	1.0	250	Φ22 药卷锚杆，L=3.0 m，间距 1.0 m×1.0 m	Φ42 锚管，L=3.0 m，每榀钢架每侧 2 根
Ⅴ级	I25b 工字钢	0.5～0.8	280	Φ25 砂浆锚杆，L=4.0 m，间距 0.8 m×0.8 m	Φ42 锚管，L=4.0 m，每榀钢架每侧 4 根

支护施工过程中，重点把控三大核心环节：

第一，锁脚锚管精细化施工管控。锁脚锚管是控制钢架下沉、约束围岩变形的核心构件，施工中严格执行标准化作业：锚管设于钢架连接钢板上方 100 mm 至 300 mm 处，钻孔垂直岩面下倾 15°至 30°，孔径较杆体直径大 15 mm，孔深超出设计长度。锚管与钢架采用 U 形钢筋双面焊接，锚管内注满 M20 水泥砂浆，待砂浆强度达设计值 70% 后方可进行下一台阶开挖；土层、软弱断层破碎带优先采用锚管，完整岩体选用全长黏结树脂锚杆，确保锚固效果。

第二，喷射混凝土全流程质量控制。采用湿喷工

艺施工，严控原材料品质，水泥选用硅酸盐或普通硅酸盐水泥，粗集料最大粒径不大于 12 mm，液体速凝剂初凝不超 3 min、终凝不超 12 min。开挖后立即初喷 20 mm 至 50 mm 混凝土封闭岩面，钢架安装后分层复喷至设计厚度，单次复喷厚度拱部不超 100 mm、边墙不超 150 mm。采用“三喷三刮一找平”工艺控制平整度，确保两突出物深长比 D/L≤1/20，钢架外侧混凝土保护层厚度不小于 20 mm，避免钢架外露锈蚀^[5]。

第三，钢架与钢筋网安装控制。钢架在洞外标准化加工，试拼合格后运至洞内，采用螺栓拼接安装，安装时严格控制中线、高程与垂直度，相邻钢架采用

Φ22 纵向连接筋内外交错布置, 环向间距 1.0 m, 形成整体受力体系。钢筋网随受喷面起伏铺设, 与钢架焊接牢固, 保护层厚度不小于 30 mm, 网片搭接长度不小于 1 个网格间距, 确保支护体系的整体性。

3.3 全流程防排水与围岩改良技术

地下水是加剧软岩大变形的因素, 本工程构建了“排、堵、截”结合的全流程防排水体系, 从源头降低水对围岩的软化作用。

隧道拱墙背后设置 FH50 软式透水管作为环向排水管, 纵向间距 10 m, 集中出水点加密布设; 边墙脚设置 HDPE DN100 打孔双壁波纹管作为纵向排水管, 外裹无纺布防止泥沙堵塞, 与环向排水管采用三通牢固连接; 横向排水管每 10 m 设置一道, 将汇水引入中央

排水沟, 形成完整的排水网络。防水层采用 1.5 mm 厚 EVA 防水板+无纺布的“一布一膜”结构, 采用无钉铺设工艺, 双缝热熔焊接, 焊接后通过充气法检测密封性, 避免地下水渗入围岩与支护结构。对于富水断层破碎带, 采用超前帷幕注浆进行堵水与围岩加固, 注浆固结范围为开挖轮廓线外 5 m, 从根本上阻断地下水通道, 同时提升围岩整体强度。

3.4 动态监测与分级预警管控体系

监控量测是软岩大变形动态管控的核心依据, 本工程建立了涵盖必测项目与选测项目的全过程监测体系, 明确了分级预警标准与管控措施, 核心监测项目与预警值见表 2。

必测项目包括洞内外观察、周边位移、拱顶下沉、

表 2 隧道软岩大变形监控量测分级预警表

管理等级	实测变形值 U_n	变形速率预警值	施工管控措施
Ⅲ级 (绿色)	$U_n < [U]/3$	$< 5 \text{ mm/d}$	正常施工, 按常规频率开展监测
Ⅱ级 (橙色)	$[U]/3 \leq U_n \leq 2[U]/3$	连续 2 d $\geq 5 \text{ mm/d}$	加密监测频率, 补强支护, 优化开挖参数
Ⅰ级 (红色)	$U_n > 2[U]/3$	连续 3 d $\geq 5 \text{ mm/d}$	立即停工, 启动应急预案, 采取紧急控变措施

(注: $[U]$ 为设计允许变形值, U_n 为现场实测变形值。)

地表下沉、拱脚下沉, 其中周边位移与拱顶下沉测点与开挖面距离不大于 2 m, 开挖后 24 h 内完成初始读数。监测频率根据变形速率与时间动态调整: 开挖后 1 d 至 15 d, 1 次/d 至 2 次/d; 16 d 至 1 个月, 1 次/2d; 1 个月至 3 个月, 1 次/周至 2 次/周。选测项目包括钢架内力、围岩压力、锚杆轴力等, 用于分析支护体系受力状态, 为支护参数优化提供依据。

建立监测数据实时反馈机制, 每日向技术负责人与监理单位报送监测结果。监测数据达橙色预警时, 立即加密监测频率, 同步采取补打锚杆、增设钢架、二次注浆等补强措施; 达红色预警时, 即刻停止掌子面开挖、组织人员撤离, 通过临时仰拱、双层支护控制围岩变形, 待变形稳定后再恢复施工。同时, 在掌子面至二次衬砌段连续布设管径 $\geq 800 \text{ mm}$ 、壁厚 $\geq 10 \text{ mm}$ 的逃生管道, 配套应急物资, 完善事故应急预案并定期开展演练, 确保突发情况快速响应。

4 结束语

本文依托强震区大店隧道工程, 系统分析了软岩大变形的发生机理, 提出了适配强震区破碎软岩的大变形防控成套施工技术, 通过超前预加固、开挖工法

优化、分级强化支护、动态监测预警等措施, 实现了隧道软岩大变形的全过程有效管控, 保障了隧道施工安全与质量。研究成果旨在为西南强震区同类软岩隧道工程提供参考。未来应进一步开展强震区不同震损程度岩体的大变形演化规律研究, 完善支护参数与围岩特性的动态适配方法, 同时探索强震区隧道运营期软岩长期变形的防控技术, 建立更具普适性的技术标准。

参考文献:

- [1] 王耀龙, 梁庆, 尹帆. 软岩大变形公路隧道施工控制技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2025, 54(09): 135-139.
- [2] 周威锦, 郑国强, 李俊兵, 等. 西南山区公路隧道软岩大变形设计处治措施研究 [J]. 山西建筑, 2025, 51(04): 134-138.
- [3] 张子洋, 汪波, 刘金炜, 等. 多级让压支护体系在软岩大变形公路隧道中的应用研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61(03): 108-118, 227.
- [4] 陈维君. 隧道软岩大变形施工技术探究: 以黑马关特长隧道为例 [J]. 交通世界, 2024(16): 144-147.
- [5] 张鑫, 王瑞兴, 席锦州, 等. 软岩大变形公路隧道病害处治关键技术 [J]. 交通科技与管理, 2024, 05(02): 147-149.