

# 基于围岩变形与受力特征的公路隧道稳定性控制及支护时机研究

田宁

四川建筑职业技术大学 四川德阳 618000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20208

**[摘要]** 在当前公路交通版图向西南大凉山、横断山脉等极高地应力区不断挺进的背景下，隧道建设者们正面临着前所未有的考验。其中，软弱破碎围岩引发的挤压型大变形是公路隧道施工的核心技术难题。本文通过复盘西南地区某深埋断层隧道工程，试图解开围岩与支护结构之间那场“动态博弈”的密码。研究不再局限于死板的数据堆砌，而是通过长期跟踪监测，剖析了围岩压力、钢架应力以及锚杆轴力在时间长河中的演变真相。实测结果表明，将仰拱闭合距离控制在1倍洞径以内，并在变形速率斜率明显趋缓的临界点及时施作二次衬砌，能够较好地协调围岩自承能力与支护结构承载力之间的关系。研究成果可为软弱围岩隧道的动态设计与信息化施工提供一定的理论依据和实践参考。

**[关键词]** 公路隧道；围岩变形；支护时机；现场监测；深埋隧道

近年来，我国地下工程建设规模持续扩大，隧道建设逐渐向复杂地质区挺进，这使我们对深部岩体力学行为规律的认识不断深化。在当前我国“交通强国”战略的引领下，高速公路隧道的建设规模、断面跨度及埋深均创下历史新高。然而，这种跨越式发展背后隐藏着极大的地质风险。当隧道穿越西南构造活跃区、深埋高地应力区或富水断层破碎带时，传统的支护经验往往捉襟见肘。软弱围岩在开挖后的响应是表现出极其复杂的非线性大变形、显著的流变效应以及强烈的空间非对称性。这种现象不仅导致初支扭曲、喷混凝土剥落，更可能引发旷日持久的“换拱”噩梦，极大地增加了工程成本与安全隐患。新奥法（NATM）核心为充分利用围岩自承能力，而适度变形界定标准、支护最佳介入时机均为工程实践中亟待明确的核心问题。因此，基于现场实测数据开展围岩变形特性分析，厘清支护受力与施工工序的耦合关系，是深化岩石力学理论研究、推动公路隧道施工信息化与智能化发展的现实需求。

## 1 隧址区地质环境与围岩大变形的内在机理

### 1.1 高地应力场下的力学响应特征

研究依托的西南项目工程地质条件特殊，地质勘察结果显示，隧址区原始地应力场以水平构造应力为主导，侧压力系数 $K_0$ 在1.2到1.5之间徘徊，个别断面甚至跳到了1.8。具体来说，隧道开挖破坏了岩体原有的三向压缩平衡状态，

切向应力迅速攀升，洞周岩体极易产生剪切破坏。在泥岩、砂岩互层或强风化花岗岩等软岩地层中，岩体受长期构造活动影响，节理发育、完整性差，开挖引起的应力扰动更容易触发“扩容效应”。这种过程在宏观上表现为持续的挤压型变形，正是深埋软岩隧道产生数百毫米甚至上千毫米位移的根本原因。现场观测发现，在未采取有效控制措施的情况下，部分断面水平收敛甚至超过500mm，远超设计预留变形量。

### 1.2 水文地质条件与围岩劣化的耦合作用

地下水是围岩失稳的关键催化因素，它不仅能产生静水压力，还会引发围岩物理力学性质劣化。根据王新平（2004）的研究，软弱围岩在含水率增加3%的情况下，其单轴抗压强度可能下降40%以上。这种物理力学性质的劣化过程，与开挖引起的应力重分布相互叠加，使得掌子面后方的围岩处于一种极其脆弱的平衡状态。一旦支护不及时或施工扰动过大，就很容易引发整体失稳。雨季条件下，地下水渗流引发围岩泥化崩解，围岩自承能力急剧降低，支护延迟将大幅提升工程失稳风险。

## 2 监控量测系统的构建及其反映的动力学过程

### 2.1 监测断面布置与传感器选型

为准确掌握围岩变形与支护结构受力演化规律，本研究在试验段采取了加密布点策略。监测内容不仅包括常规的拱顶沉降与水平收敛观测，还引入了深层位移计，用于监测塑

性区扩展深度。支护结构内部则埋设了钢筋计与频率类压力盒,分别用于量测钢拱架内力分布与围岩压力变化。测点布设参数为:沿隧道轴向每隔5~10米布设一个监测断面,断层破碎带段加密至3~5米一个断面;每个断面布设拱顶沉降点2个、水平收敛基线3条、深层位移测孔2个、钢拱架应变测点12个、围岩压力盒6个、锚杆轴力计6支。

## 2.2 围岩变形的时间效应分析

监测数据揭示了一个显著规律:围岩变形并非线性增长,而是呈现出明显的阶段性特征。开挖后72小时为围岩能量快速释放阶段,该时段变形量占总变形量的15%,软岩流变特性显著,部分断面初期支护施作后变形趋于稳定,后期仍会出现持续变形,流变变形将直接影响二次衬砌施作时机。若初期支护承载力未预留流变变形余量,易出现喷混凝土开裂、钢支架屈服扭曲等病害。在本工程中,部分断面在支护完成后三个月仍能观测到累计2至3毫米的持续收敛,说明流变效应的影响不可忽视。

## 3 支护介入时机的理论模型与深度探讨

### 3.1 基于收敛-约束法的力学解析

收敛-约束理论可直观解析支护介入时机的力学机制,围岩特征曲线体现围岩压力随位移增大逐渐降低的规律,支护特征曲线体现支护结构荷载随位移增大的变化规律。在理想状态下,支护应在围岩压力下降到较低点且位移尚在可控范围内时介入。在软弱地层中,由于岩体存在明显的流变性质,围岩特征曲线会随时间发生下移。这意味着如果支护介入过晚,平衡点可能移动到支护结构的承载力曲线之外,导致系统崩溃。反之,如果介入过早,支护结构将承受过高的围岩压力,同样面临破坏风险。

### 3.2 初期支护的介入时机

实测数据证明,开挖后24小时内的支护介入程度,直接决定隧道的变形量。不同施工段对比结果表明,凡是能在开挖后12小时内完成初喷、24小时内架设钢架并闭合锁脚锚管的断面,其最终变形量较平均值降低了约25%~30%。这种“以快制动”的策略,其核心在于抑制围岩表层的松弛,防止塑性区向深部恶性扩张。在实际操作中建立一套动态反馈机制尤为重要:每循环开挖后,现场技术人员立即进行变形监测,若发现变形速率超过预警值,立即调整支护参数或加快支护节奏,这种“边监测、边调整”的方式有效提升了初

期支护的针对性和及时性。

### 3.3 二次衬砌介入时机的争议与重构

传统观点是坚持变形基本稳定后再施作,但在高地应力软岩隧道中,由于流变时间极长,若死守这一指标,初期支护可能因长时间承受高荷载而进入疲劳屈服状态。本工程初期就曾因过分追求绝对稳定,导致初期支护长时间暴露在高应力环境中,最终出现钢架扭曲、喷层开裂等问题。二次衬砌介入时机应依据围岩压力释放比确定,当初期支护分担了约80%以上的预期荷载,且变形速率出现显著收敛拐点时,即使日变形量仍略超0.2毫米每天的指标,也应及时施作二衬,利用二衬的较大刚度彻底锁定变形,防止支护系统整体失稳。

## 4 复杂环境下稳定性控制的优化路径

### 4.1 施工工法的精细化选择

软弱破碎围岩大断面公路隧道开挖工法的核心,是实现围岩能量释放节奏的精准调控。西南山区高地应力段试验结果表明,全断面开挖、大台阶开挖易引发围岩应变集中释放,支护结构难以承受;相比之下,三台阶七步开挖法由于将庞大的开挖断面拆解为多个互为支撑的小单元,表现出极佳的适应性。该工法将开挖断面分为上、中、下三个台阶,每个台阶又细分为多个作业步,使围岩应力分步释放,避免了一次性卸荷过大。在试验中,三台阶法带来的多个作业平台,使得钢拱架的架设与锁脚锚管的施工可以实现纵向交错进行,从而在时空上最大限度地缩短了围岩暴露时间,为后续初期支护系统的强度建立赢得了宝贵的“安全余量”。

### 4.2 非对称加强支护策略的实践

断层地质引发的围岩偏压问题,需采用非对称支护设计予以解决。通过监测数据反馈,识别出受力峰值区域,针对性地加密该侧钢拱架、增加锁脚锚管的数量或长度。有研究曾针对四川某软弱地层隧道指出,增强拱顶内侧与墙脚外侧的非对称配筋,能使二衬结构的安全系数提升1.5倍。这种设计理念从根本上打破了经验主义的对称束缚,使支护结构的承载刚度与围岩的实际偏压需求实现精准匹配,不仅规避了塌方风险,也显著优化了成本结构。本工程将偏压侧钢拱架间距由0.6m加密至0.5m,并增设2根锁脚锚管,监测显示该侧围岩压力分布均匀性与结构受力状态显著改善。

### 4.3 锚固系统的革新

传统砂浆锚杆在破碎软岩中难以形成有效锚固力, 变形剧烈段宜采用预应力锚索或自进式锚杆。本文建议在变形最为剧烈的段落引入预应力锚索或自进式锚杆, 自进式锚杆自带钻头可实现钻进与注浆一体化, 特别适用于易塌孔地层; 预应力锚索则可通过施加预应力主动补偿开挖造成的径向应力损失, 从而在源头上抑制围岩的塑性流动。实地监测数据显示, 引入主动锚固系统的断面, 其初期收敛速率由原先的每天 15 毫米降至 8 毫米以下, 降幅达 40% 以上。

## 5 工程实证研究

### 5.1 工程概况与初步支护设计

ZK31 断面位于深埋 420 米的泥页岩地层, 此区域处于典型的极高地应力场, 最大水平主应力达到 12.5 至 14.25 兆帕, 且伴有明显的断层活动痕迹。岩性以炭质页岩为主, 夹薄层砂岩岩体破碎, 节理裂隙发育, 局部可见擦痕和镜面, 属于典型的挤压型软弱围岩。原设计的初期支护参数采用了公路隧道典型的 V 级围岩配置: I20a 型钢拱架, 纵向间距 0.6 米, 喷射 C25 混凝土厚度 26 厘米, 并结合 4.5 米长的系统锚杆。仰拱与掌子面间距控制在 35 米左右, 二次衬砌按常规做法在变形趋于稳定后施作。在施工初期, 现场基本遵循常规经验进行操作, 即等待围岩变形达到肉眼可见的稳定后再施作二次衬砌。但这种策略在极高应力面前迅速失效。在进入该断面仅 10 米后, 支护结构便爆发了系统性危机: 钢拱架发生明显扭曲, 喷射的混凝土大面积开裂剥落, 部分段落拱顶下沉达 280 毫米, 水平收敛突破了 215 毫米, 已经侵入建筑限界, 因此不得不进行临时加固和换拱处理。

### 5.2 监测反馈引发的方案调整

数据显示, 该断面变形具有两个显著特征: 一是变形速率长期居高不下, 日收敛速率维持在 5 毫米左右, 未见明显收敛趋势; 二是仰拱闭合滞后是变形失控的关键因素, 仰拱距掌子面达 35 米以上, 形成开口型受力状态, 拱脚缺乏有效约束。针对上述问题, 专家组果断调整策略: 一是将仰拱闭合距离强制压缩至 12 米以内, 实现仰拱及时跟进; 二是针对拱脚处发生的明显下沉, 在型钢拱脚两侧各增设 2 根长 6 米、直径 42 毫米的强力锁脚锚管, 并与型钢翼缘进行满焊, 确保拱脚稳定性; 三是改变过去追求绝对静止的教条, 当监测到日变形速率收敛至 1.0 毫米/每天, 且位移曲线斜率开始由陡峭转为圆滑的拐点时, 即判定为可进行二次衬砌施作的机会窗,

可迅速跟进二衬。

### 5.3 调整后的效果评估

调整方案实施后, 后续 50 米范围内未再出现二衬开裂或初支换拱。数据对比显示: 拱顶下沉由原先的 280 毫米降低至 145 毫米, 水平收敛由 215 毫米降低至 110 毫米, 变形量显著下降且收敛速率平稳。钢拱架应力监测显示, 调整后得支护结构受力更加均匀, 峰值应力有所降低, 且未出现超限情况。这一数据不仅验证了“快闭合、强锁脚、适时二衬”在软岩大变形控制中的核心价值, 也论证了一个工程哲学: 在深埋高地应力环境下, 支护时机往往比支护的厚度更加重要。

## 结语

本文通过对西南某典型公路隧道深埋断层破碎带段的系统监测与分析, 得出以下主要结论: 第一, 深埋软岩隧道围岩变形呈现明显的阶段性特征, 初期应力释放迅速, 后期流变效应持久, 支护设计需充分考虑两者的影响。第二, 初期支护的及时性至关重要, 开挖后 24 小时内完成关键支护工序, 可显著降低最终变形量。第三, 二次衬砌的施作时机不应拘泥于固定的变形速率指标, 而应结合围岩压力释放比和变形曲线拐点综合判断, 实现适时支护。第四, 非对称加强支护、三台阶七步开挖法以及主动锚固系统的应用, 在高地应力软弱围岩条件下具有良好的控制效果。第五, 工程实证表明: “快闭合、强锁脚、适时二衬”是控制软岩大变形的有效技术路径。尽管本文在围岩变形特性与支护时机方面取得了一些定量认识, 但面对更加复杂的高温、高渗透压、超深埋隧道, 岩石的流变-损伤耦合机理仍有待深入探索。未来的公路隧道施工将全面步入“智能建造”时代。利用数字孪生技术, 将实测监测数据实时反馈至 AI 预测模型, 实现支护参数的分钟级自动修正, 将是攻克大变形世界性难题的终极路径。

## 【参考文献】

- [1] 马佳. 公路隧道围岩变形机理与支护结构受力分析[J]. 市政技术, 2023 (6): 144-149.
- [2] 胡森森. 软弱地层公路隧道围岩变形及支护结构受力特性研究[J]. 交通世界, 2024 (33): 134-136.
- [3] 任强. 我国炭质板岩隧道修建技术研究现状[J]. 建筑技术开发, 2020 (19): 87-88.