

# 软弱围岩隧道初期支护参数优化

王程瑜

四川川交路桥有限责任公司隧道分公司 四川 德阳 618300

**【摘要】**：软弱围岩隧道施工中，初期支护作为控制围岩变形、保障结构稳定的核心环节，其参数合理性直接关系工程安全与经济性。针对软弱围岩强度低、变形量大、自稳能力差的特点，本文分析影响初期支护参数设计的关键因素，提出融合数值模拟、理论计算与多目标优化的参数设计方法，结合现场监测与试验验证优化方案的可行性。研究表明，通过科学优化锚杆长度、喷射混凝土厚度及钢支撑间距等核心参数，可在保证施工安全的前提下降低工程成本，为同类工程提供技术参考。

**【关键词】**：软弱围岩；隧道工程；初期支护；参数优化；数值模拟

DOI:10.12417/2811-0528.26.07.029

## 1 引言

随着交通基础设施向复杂地质区域延伸，软弱围岩隧道的施工比例逐年增加。软弱围岩多表现为岩体完整性差、节理发育、抗压强度低，开挖后易发生大变形、坍塌等地质灾害<sup>[1]</sup>。初期支护作为新奥法施工的核心工序，通过锚杆、喷射混凝土、钢支撑的协同作用，与围岩形成共同受力体系，约束围岩变形并发挥其自承能力<sup>[2]</sup>。当前部分工程仍依赖经验公式设计初期支护参数，缺乏对具体地质条件的针对性分析，要么参数保守导致成本浪费，要么参数不足引发安全风险。因此，开展软弱围岩隧道初期支护参数优化研究，实现安全与经济的平衡，具有重要的工程实践价值。

## 2 初期支护参数设计影响因素分析

### (1) 地层条件

地层物理力学性能是参数设计的首要依据。软弱围岩单轴抗压强度普遍低于 10MPa，且含水率与节理发育程度直接影响支护需求。富水地层需强化防水排水设计，同时提高支护结构抗渗能力；节理密集地层需加密锚杆布置，增强围岩咬合整体性。对于 V 级及以上软弱围岩，自稳时间短，需采用高强度组合支护形式，必要时增设超前支护措施。

### (2) 隧道断面特征

断面尺寸与形状决定围岩应力分布状态。大断面隧道开挖后塑性区范围更广，支护结构承受的弯矩和剪力显著增大，需相应提高支护刚度。相同地层条件下，大跨度隧道的钢支撑型号需提升 1 至 2 个等级，喷射混凝土厚度增加 5 至 10 厘米。马蹄形断面相较于圆形断面更适应软岩收敛变形，可通过优化钢支撑曲率减少应力集中。

### (3) 施工工法

施工工法通过影响围岩扰动范围与支护时机，作用于参数设计。台阶法施工需重点加强拱部支护参数，控制上台阶开挖

后的围岩变形；CD 法或 CRD 法通过分块开挖降低单次扰动，可适当优化单块支护强度，但需保证中隔壁结构稳定。短进尺开挖能减少围岩暴露时间，可适度降低支护参数<sup>[3]</sup>；长进尺开挖则需强化支护以应对更大扰动。

## 3 初期支护参数优化方法

### (1) 数值模拟优化

采用地层-结构法建立三维数值模型，将围岩与初期支护作为协同受力体系，模拟施工过程中围岩应力与位移变化。选取摩尔-库仑模型或德鲁克-普拉格模型表征软弱围岩力学特性，通过调整锚杆长度、喷射混凝土厚度、钢支撑间距等参数，分析不同组合下的支护效果。以围岩位移不超过允许值、支护内力小于材料设计强度为约束条件，筛选最优参数组合。某软弱围岩隧道工程中，通过数值模拟对比不同锚杆长度效果，发现长度从 3 米增至 7 米时围岩变形显著减小，超过 7 米后优化效果趋于平缓，最终确定 7 米为最优锚杆长度。

### (2) 理论计算与经验修正

结合弹性力学与土力学理论计算支护结构受力，采用普氏理论确定围岩压力，通过结构力学方法核算钢支撑与锚杆承载能力。对传统经验公式引入地层修正系数和断面尺寸修正系数，使其更贴合工程实际。例如喷射混凝土厚度计算公式可修正为厚度等于修正系数乘以断面面积平方根，修正系数通过数值模拟结果反演确定。

### (3) 多目标优化分析

建立安全与经济双目标优化体系，安全目标包括围岩最大位移、支护结构最大应力，经济目标涵盖材料用量与施工成本。采用层次分析法确定各目标权重，通过优化算法求解平衡方案。V 级围岩优先保障安全，适度提高支护参数；III 级及以上围岩可侧重经济性，在安全阈值内优化参数。

## 4 优化参数现场验证

### (1) 监测方案设计

选取典型试验段，设置优化参数与原设计参数对比组，试验段长度控制在 50 米，确保地质条件均一性以排除干扰因素。沿隧道纵向每 5 至 10 米布设一个监测断面，每个断面布置 5 至 7 个监测点，拱顶、边墙及拱脚关键位置均单独设点，采用全站仪与收敛计同步监测围岩收敛和拱顶下沉，数据实时记录并传输至后台系统。监测频率初期为每天 1 至 2 次，重点跟踪开挖后 72 小时内的变形速率，待位移日变化量稳定低于 2 毫米后，调整为每 3 至 7 天 1 次，全程监测周期不少于 30 天。同时在钢支撑、锚杆及喷射混凝土中埋设应力传感器和应变片，精准捕捉支护结构在施工全过程中的内力变化规律。

### (2) 监测结果分析

某隧道 V 级软弱围岩段优化后参数为锚杆直径 28 毫米、长度 2.5 米，喷射混凝土厚度 28 厘米，钢支撑采用 I120b 型钢、间距 0.8 米，原设计参数则为锚杆长度 3 米、喷射混凝土厚度 32 厘米、钢支撑间距 0.6 米。监测数据显示，优化组拱顶下沉量控制在 80 毫米以内，周边收敛速率低于 2 毫米每天，均满足规范规定的控制标准，而原设计组拱顶下沉量虽略低但仅为 65 毫米左右，收敛速率无明显优势。支护内力分布均匀，无明显应力集中现象，最大内力值较材料设计强度预留 30% 安全储备，相较于原设计参数不仅减少了材料消耗，综合成本降低 12%，实现了安全与经济的双重提升。

表 1 优化后参数

参数类型	原设计参数	优化后参数	优化效果说明
锚杆规格	长度 3m、直径 28mm	长度 2.5m、直径 28mm	缩短长度 16.7%，不影响锚固效果
喷射混凝土厚度	32cm	28cm	减薄 12.5%，节约材料用量
钢支撑参数	I120b 型钢、间距 0.6m	I120b 型钢、间距 0.8m	间距增大 33.3%，降低施工密度

拱顶下沉量	约 65mm	≤80mm	均满足规范要求，优化组略高但可控
周边收敛速率	≤2mm/天	≤2mm/天	两者效果一致，均达稳定标准
综合成本变化	基准值	降低 12%	实现经济性提升，安全储备充足

不同参数对围岩变形的影响存在差异，其中喷射混凝土厚度增加对拱顶沉降控制效果显著，每增加 5 厘米厚度可使拱顶下沉量减少 15% 左右，但超过 30 厘米后边际效益快速递减。锚杆长度优化对围岩整体性提升作用明显，合理的锚杆长度能有效穿透破碎带，将表层围岩与深部稳定岩体锚固为整体，过长则易导致锚杆端部受力集中而失效。钢支撑间距调整直接影响支护刚度分配，间距缩小可提升整体承载能力，但过密会增加施工工序衔接难度，优化后的间距既保证了支护连续性，又为后续衬砌施工预留了充足空间。

### (3) 试验段验证效果

试验段施工中，优化参数组严格按照新奥法施工原则组织工序，未出现围岩失稳、支护开裂等异常现象，施工效率较原设计组提升 10%，单循环作业时间缩短约 1.5 小时。通过钻芯法随机抽取 10 个检测点，喷射混凝土 28 天抗压强度均达 30MPa 以上，远超设计要求的 25MPa 标准，锚杆抗拔力抽样检测合格率 100%，均超过 150kN 的设计值。同时结合地质雷达探测结果，优化支护段围岩完整性明显优于原设计段，破碎带填充密实度提升，对比试验充分表明，优化参数在有效控制围岩变形、保障施工安全的同时，显著降低了材料损耗和人工成本，具备广泛推广价值。

## 5 结论与展望

软弱围岩隧道初期支护参数优化需综合考虑地层条件、断面特征与施工工法，采用数值模拟、理论计算与多目标优化相结合的方法，可实现参数科学设计。现场监测与试验验证表明，优化后的参数能有效控制围岩变形，降低工程成本 10% 至 15%，具有显著技术经济价值。未来可结合智能监测技术与大数据分析，实现支护参数的动态优化与实时调整，进一步提升软弱围岩隧道施工的精准度与安全性。

## 参考文献:

- [1] 陈丽俊,张家瑞,陈建勋,等.软弱围岩隧道初期支护承载力计算方法与参数综合比选[J].长安大学学报(自然科学版),2025,45(04):68-80.
- [2] 夏俊伟.软弱围岩隧道加固与稳定性控制[J].交通世界,2025,(24):166-169.
- [3] 王锋涛.软弱围岩隧道工程技术探究[J].中国高新科技,2024,(11):148-149+157.