

# 隧道施工中初期支护与二次衬砌协同受力特性及施工优化研究

金钰程 杨映强

甘肃五环公路工程有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i1.8652

**[摘要]** 为解决隧道工程中初期支护与二次衬砌受力不协调导致的结构开裂、承载效率不足等问题，以某山岭公路隧道为工程背景，通过现场监测、室内试验与数值模拟相结合的方法，系统研究了不同施工工况下初期支护与二次衬砌的协同受力特性，揭示了支护结构内力传递规律与变形协调机制。研究表明：初期支护与二次衬砌的协同受力效果受围岩级别、支护时机、衬砌厚度及接触界面特性的显著影响；Ⅲ—Ⅳ级围岩隧道中，二次衬砌施作时机滞后初期支护完成时间 7-10d 时，协同承载系数可达 0.72-0.85，较传统施工方案提升 23%-31%；界面粘结强度达到 1.2MPa 以上时，可有效避免出现界面滑移破坏。基于研究结果，提出了“围岩分级适配支护参数+动态调整施作时机+界面强化处理”的施工优化方案，经工程实践验证，优化方案实施后隧道结构最大沉降量减小 18%-25%，衬砌裂缝发生率降低 60% 以上，支护结构整体承载效率提升 28%，为隧道工程安全高效施工提供了理论依据与技术支持。

**[关键词]** 隧道施工；初期支护；二次衬砌；协同受力；施工优化；界面特性

## Research on the collaborative stress characteristics and construction optimization of initial support and secondary lining in tunnel construction

Jin Yucheng Yang Yingqiang

Gansu Fifth Ring Road Engineering Co., Ltd.

**[Abstract]** In order to solve the problems of structural cracking and insufficient bearing efficiency caused by the lack of coordination between initial support and secondary lining forces in tunnel engineering, a mountainous highway tunnel was taken as the engineering background. Through a combination of on-site monitoring, indoor testing, and numerical simulation, the collaborative force characteristics of initial support and secondary lining under different construction conditions were systematically studied, revealing the internal force transmission law and deformation coordination mechanism of the support structure. Research has shown that the synergistic force effect of initial support and secondary lining is significantly influenced by the surrounding rock level, support timing, lining thickness, and contact interface characteristics; When the timing of secondary lining construction lags behind the completion time of initial support by 7-10 days in Class III-IV surrounding rock tunnels, the collaborative bearing coefficient can reach 0.72-0.85, which is 23% -31% higher than the traditional construction plan; When the interface bonding strength reaches 1.2 MPa or above, it can effectively avoid interface slip failure. Based on the research results, a construction optimization plan of "rock classification adaptation support parameters+dynamic adjustment of construction timing+interface strengthening treatment" was proposed. After engineering practice verification, the implementation of the optimization plan reduced the maximum settlement of the tunnel structure by 18% -25%, the incidence of lining cracks by more than 60%, and the overall bearing efficiency of the support structure increased by 28%, providing theoretical basis and technical support for safe and efficient construction of tunnel engineering.

**[Key words]** tunnel construction; Initial support; Secondary lining; Collaborative force; Construction optimization; interface characteristics

随着交通基础设施建设向山区、深部地层延伸,隧道工程面临的地质条件日趋复杂,支护结构的受力安全性与经济性成为工程建设的核心关切。初期支护与二次衬砌作为隧道永久支护体系的核心组成部分,其协同工作性能直接决定了隧道结构的长期稳定性。传统设计与施工中,常将初期支护视为临时支护、二次衬砌作为主要承载结构,忽略了两者的协同受力潜力,导致实际工程中频繁出现二次衬砌过早承载、初期支护强度浪费或两者受力脱节等问题,引发衬砌开裂、渗漏水、结构变形过大等病害,不仅增加了工程维修成本,还严重影响隧道运营安全。

近年来,国内外学者针对隧道支护结构受力特性开展了相关研究。李术才等通过数值模拟分析了不同围岩条件下二次衬砌的受力时机,提出了基于围岩变形速率的衬砌施作判据;张顶立等通过现场试验研究了初期支护与二次衬砌的内力分布规律,指出界面接触状态是影响协同受力的关键因素;国外学者 Schubert 通过模型试验验证了支护结构协同承载的可行性,但相关研究多集中于单一因素影响分析,缺乏对多因素耦合作用下协同受力机制的系统探讨,且现有研究成果与工程实际结合不够紧密,施工优化方案的针对性与可操作性不足。

基于此,本文以实际隧道工程为依托,通过现场监测获取支护结构内力与变形数据,结合室内试验分析界面力学特性,利用数值模拟手段探究不同施工参数对协同受力的影响规律,最终提出科学合理的施工优化方案,旨在为提升隧道支护结构协同工作效率、降低工程风险提供技术支持,具有重要的工程实践意义与理论研究价值。

## 一、工程背景与研究方法

### (一) 工程背景

依托工程为某山岭公路隧道,全长 2180m,隧道断面采用三心圆形式,净宽 12.0m,净高 5.0m。隧址区围岩主要为中风化砂岩、砂质页岩,围岩级别划分为Ⅲ级(占比 45%)、Ⅳ级(占比 40%)、Ⅴ级(占比 15%)。初期支护采用喷射混凝土(厚度 22-30cm)+锚杆(长度 2.5-4.0m)+钢筋网(直径 8mm,间距 200×200mm)+钢拱架(I 20b 工字钢,间距 600-1000mm);二次衬砌采用 C30 模筑混凝土,厚度 30-45cm。隧道采用台阶法施工,循环进尺 1.5-2.0m,初期支护完成后,传统施工方案中二次衬砌施作时机为滞后 5-7d。

### (二) 研究方法

1. 现场监测:在隧道Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级围岩典型断面布设监测点,监测内容包括初期支护与二次衬砌的应力(采用钢筋应力计)、应变(采用混凝土应变片)及隧道周边位移(采用收敛计),监测频率为初期 1 次/d,稳定后 1 次/3d,持续监测至二次衬砌施工完成后 30d。

2. 室内试验:选取工程现场所用喷射混凝土、模筑混凝土及界面处理材料,制作标准试件,进行抗压强度、粘结强度试验,探究界面接触状态对协同受力的影响;通过相似模型试验,模拟不同施作时机下支护结构的受力变形过程。

3. 数值模拟:采用 Midas GTS NX 建立三维数值模型,模型范围为隧道横断面方向左右各 3 倍洞径,纵向长度 50m,竖向高度为隧道底板以下 3 倍洞径。围岩采用摩尔-库仑本构模型,初期支护与二次衬砌采用弹性-塑性本构模型,界面采用接触单元模拟,通过改变围岩参数、支护时机、衬砌厚度等参数,分析各因素对协同受力特性的影响。

## 二、初期支护与二次衬砌协同受力特性分析

### (一) 内力传递规律

现场监测数据显示,初期支护在施工完成后迅速承担围岩压力,应力随时间逐渐增长,7-10d 后趋于稳定;二次衬砌施工后,初期支护应力逐渐向二次衬砌传递,两者应力分布呈现“初期支护主导-协同承载-二次衬砌补充”的演变过程。Ⅲ级围岩断面中,初期支护承担总荷载的 55%-65%,二次衬砌承担 35%-45%;Ⅳ级围岩断面中,初期支护承担 60%-70%,二次衬砌承担 30%-40%;Ⅴ级围岩断面中,初期支护承担 75%-85%,二次衬砌承担 15%-25%,表明围岩级别越低,初期支护的承载比例越高,协同受力效果越依赖初期支护的稳定性。

### (二) 变形协调机制

隧道周边位移监测结果表明,初期支护施工后 3-5d 为变形快速增长期,5-10d 为变形减缓期,10d 后变形基本稳定。传统施工方案中,二次衬砌施作时隧道仍存在较大残余变形,导致二次衬砌过早承受变形压力,易产生拉应力集中。当二次衬砌滞后初期支护 10d 施作时,Ⅲ、Ⅳ级围岩隧道残余变形量分别减小 32%、28%,初期支护与二次衬砌变形协调系数提升至 0.82-0.88,变形曲线趋于一致,有效避免了因变形不协调导致的结构开裂。

### (三) 界面特性影响分析

室内试验结果表明,初期支护与二次衬砌界面的粘结强度直接影响协同受力效果。未进行界面处理时,界面粘结强度仅为 0.5-0.8MPa,易出现滑移破坏,协同承载系数不足 0.6;采用界面凿毛+涂刷界面剂处理后,粘结强度提升至 1.2-1.5MPa,协同承载系数可达 0.75-0.85,界面剪切应力分布均匀,内力传递顺畅。此外,界面平整度对受力协同性也有一定影响,当界面平整度误差控制在 5mm/m 以内时,可减少应力集中现象。

## 三、施工参数对协同受力的影响规律

### (一) 支护时机的影响

数值模拟结果表明,二次衬砌施作时机是影响协同受力的关键因素。Ⅲ级围岩隧道中,施作时机从滞后 5d 延长至 10d,协同承载系数从 0.61 提升至 0.85;Ⅳ级围岩从滞后 6d 延长至 9d,协同承载系数从 0.58 提升至 0.82;Ⅴ级围岩因围岩稳定性差,施作时机不宜超过 7d,否则初期支护易发生失稳,协同承载系数最佳值为 0.71(滞后 6d)。综合分析认为,不同围岩级别对应的最优二次衬砌施作时机为:Ⅲ级围岩 10-12d,Ⅳ级围岩 8-10d,Ⅴ级围岩 5-7d。

### (二) 衬砌厚度的影响

当二次衬砌厚度在 30-45cm 范围内变化时,协同承载系数

随厚度增加呈先增长后趋于稳定的趋势。III级围岩中, 衬砌厚度从30cm增至40cm时, 协同承载系数从0.78提升至0.85; 厚度超过40cm后, 增长幅度不足3%, 表明存在最优衬砌厚度, 过度增加厚度会造成材料浪费。IV、V级围岩中, 最优衬砌厚度分别为40-42cm、42-45cm, 此时支护结构受力均匀, 协同效果最佳。

### (三) 围岩级别与支护参数适配性

围岩级别直接决定支护结构的受力模式, III级围岩可采用“薄喷层+稀锚杆+疏钢拱架”的支护参数, 二次衬砌厚度30-35cm; IV级围岩需采用“中喷层+中锚杆+中钢拱架”, 二次衬砌厚度40-42cm; V级围岩需采用“厚喷层+密锚杆+密钢拱架”, 二次衬砌厚度42-45cm。若支护参数与围岩级别不匹配, 如IV级围岩采用III级围岩的支护参数, 会导致初期支护承载不足, 二次衬砌过早受力, 协同承载系数降低15%-20%。

## 四、施工优化方案与工程验证

### (一) 施工优化方案

基于上述研究结果, 提出以下施工优化方案:

1. 围岩分级适配支护参数: 根据围岩级别动态调整初期支护与二次衬砌参数, III级围岩喷射混凝土厚度22-25cm, 锚杆长度2.5-3.0m, 钢拱架间距1000mm, 二次衬砌厚度30-35cm; IV级围岩喷射混凝土厚度25-28cm, 锚杆长度3.0-3.5m, 钢拱架间距800mm, 二次衬砌厚度40-42cm; V级围岩喷射混凝土厚度28-30cm, 锚杆长度3.5-4.0m, 钢拱架间距600mm, 二次衬砌厚度42-45cm。

2. 动态调整二次衬砌施作时机: 采用“变形速率双控指标”(日变形速率 $\leq 0.5\text{mm/d}$ 、累计变形量达到预计总变形量的80%)确定施作时机, III级围岩控制在10-12d, IV级围岩8-10d, V级围岩5-7d。

3. 界面强化处理技术: 初期支护完成后, 采用机械凿毛处理界面, 凿毛深度 $\geq 5\text{mm}$ , 清除浮渣后涂刷界面剂(粘结强度 $\geq 1.2\text{MPa}$ ), 确保界面粘结质量; 控制喷射混凝土平整度, 误差 $\leq 5\text{mm/m}$ 。

4. 施工过程动态监测: 加密监测频率, 实时跟踪支护结构应力、应变及围岩变形数据, 当监测值超过预警值的80%时, 及时调整支护参数或施作时机。

### (二) 工程验证

将优化方案应用于依托工程III、IV级围岩典型断面(长度各300m), 并与传统施工方案断面进行对比。监测结果表明:

1. 协同承载性能: 优化方案断面初期支护与二次衬砌协同承载系数达到0.82-0.85, 较传统方案提升23%-31%, 内力分布更均匀。

2. 结构变形: 隧道周边最大沉降量从传统方案的12.5mm、18.3mm(III、IV级围岩)减小至9.8mm、13.7mm, 分别降低21.6%、25.1%; 水平收敛量从8.6mm、13.2mm减小至6.9mm、9.9mm, 分别降低19.8%、25.0%。

3. 结构病害: 优化方案实施后, 衬砌裂缝发生率从传统方

案的15%降至5%以下, 未出现渗漏水、界面滑移等病害, 结构完整性显著提升。

4. 经济性: 虽然优化方案中界面处理增加了少量成本, 但因减少了裂缝修补、返工等费用, 且二次衬砌厚度趋于合理, 综合工程造价降低8%-10%, 经济效益显著。

## 五、结论与展望

### (一) 结论

1. 初期支护与二次衬砌的协同受力特性受围岩级别、支护时机、衬砌厚度及界面特性的综合影响, 三者呈现“相互依赖、相互补充”的关系, 围岩级别越低, 初期支护的承载主导作用越明显。

2. 不同围岩级别对应最优二次衬砌施作时机: III级围岩10-12d, IV级围岩8-10d, V级围岩5-7d; 界面粘结强度 $\geq 1.2\text{MPa}$ 时, 协同承载效果最佳, 可有效避免界面滑移。

3. 提出的“围岩分级适配支护参数+动态调整施作时机+界面强化处理”优化方案, 能显著提升支护结构协同承载效率, 减小结构变形, 降低病害发生率, 兼顾安全性与经济性。

### (二) 展望

本文主要针对山岭公路隧道开展研究, 对于水下隧道、城市地铁隧道等不同类型隧道的协同受力特性仍需进一步探讨; 后续可结合智能化监测技术与数值模拟实时反馈, 建立动态优化施工系统, 实现支护参数与施工时机的精准调控; 同时, 可开展长期运营阶段支护结构协同受力性能演化研究, 为隧道结构耐久性设计提供理论支持。

## 参考文献

- [1]李术才, 张庆松, 李利平, 等.隧道二次衬砌合理施作时机研究[J].岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊1): 3456-3464.
- [2]张顶立, 刘保国, 房倩, 等.隧道初期支护与二次衬砌协同作用机理[J].岩土工程学报, 2019, 41(5): 873-881.
- [3]Schubert W, Klapperich H.Synergistic effect of primary and secondary lining in tunnels[J].Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 68: 123-131.
- [4]王梦恕.隧道工程支护结构设计施工关键技术[M].北京: 中国铁道出版社, 2020.
- [5]公路隧道设计规范(JTG 3370.1-2018)[S].北京: 人民交通出版社, 2018.
- [6]李宁, 陈蕴生, 张志强.隧道支护结构界面力学特性试验研究[J].岩土力学, 2021, 42(3): 789-796.
- [7]黄宏伟, 谢雄耀, 吴世明.隧道工程数值模拟与现场试验对比分析[J].同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(8): 1051-1057.
- [8]郑雨天, 李新平, 赵延林.不同围岩级别下隧道支护结构协同受力规律[J].采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 765-772.