

软岩隧道大变形段支护结构适应性分析

张毅杰

四川康新高速公路有限责任公司 四川 康定 626000

【摘要】：软岩隧道大变形段因岩体强度低、遇水易软化、应力释放显著等特征，对支护结构的承载与变形协调能力提出极高要求。本文结合软岩隧道大变形的产生机理与特征，系统分析喷射混凝土、锚杆、钢拱架及联合支护等常用支护结构的工作特性。研究表明，单一支护结构难以满足大变形段支护需求，基于岩体变形等级采用“超前支护+初期联合支护+二次衬砌”的动态支护体系，可有效提升支护结构的适应性与稳定性，为软岩隧道大变形段支护设计与施工提供参考。

【关键词】：软岩隧道；大变形段；支护结构；适应性；联合支护

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.031

1 引言

支护结构作为控制软岩大变形的核心手段，其适应性直接决定隧道的施工安全、工期进度及长期稳定性。例如四川川西高速沿线穿越龙门山断裂带等复杂地质区域，在建隧道普遍面临软岩地层分布广、岩性软弱破碎、风化程度高、地下水富集等突出问题，软岩大变形引发的支护结构开裂、侵限等病害时有发生，严重制约工程建设效率与质量。目前常用的支护结构类型多样，但不同结构的承载能力、变形协调能力及适用条件存在显著差异，尤其在川西高速特殊的高应力、强卸荷软岩环境下，现有支护方案的适应性仍需进一步验证与优化。因此，结合川西高速在建工程特征，深入分析软岩隧道大变形的产生机理，明确各类支护结构在该区域特殊地质条件下的适应性特征，针对性优化支护方案，对提升高速软岩隧道建设质量、保障工程安全稳定具有重要的工程意义与实践价值。本文基于软岩隧道的基本地质特征与大变形表现，系统开展支护结构适应性分析，为川西高速及同类区域软岩隧道工程实践提供理论支撑与技术参考。

2 软岩隧道大变形特征与产生机理

2.1 大变形核心特征

软岩隧道大变形与硬岩隧道变形存在本质区别，其核心特征主要体现在三个方面。一是变形量大，围岩累计变形量通常可达数十厘米甚至数米；二是变形持续时间长，应力释放过程缓慢，变形稳定周期可达数月，部分隧道运营期仍存在缓慢变形；三是变形协调性差，受岩体结构面、含水量等因素影响，隧道周边变形呈现非均匀性，易导致局部应力集中。此外，软岩隧道大变形具有显著的环境敏感性，遇水后岩体强度大幅衰减，变形量会进一步增大，且变形破坏具有突发性。

2.2 大变形产生机理

软岩隧道大变形的产生是岩体自身特性、应力环境及施工扰动共同作用的结果。从应力角度看，隧道开挖打破原岩应力平衡，软岩自身承载能力弱，难以承受开挖后的二次应力，易发生塑性屈服，导致应力持续释放并转化为显著的塑性变形。从岩体结构角度看，软岩中存在大量软弱夹层、节理裂隙等结构面，开挖后结构面易发生滑移或张开，加剧围岩破碎与变形。从水理作用角度看，软岩中的黏土矿物遇水后会膨胀、软化，不仅降低岩体强度，还会产生膨胀压力，进一步诱发或增大变形。施工扰动则会破坏围岩的完整性，加速应力释放与变形发展。

3 常用支护结构类型及适应性分析

3.1 单一支护结构类型

喷射混凝土是隧道初期支护的基础形式，通过与围岩紧密粘结形成整体承载结构，可快速封闭围岩、防止风化与掉块。锚杆支护通过锚固力将围岩浅层与深层稳定岩体连接，提升围岩自身承载能力，同时抑制岩体裂隙发育。钢拱架支护具有刚度大、承载能力强的优势，能快速提供支护反力，约束围岩初期大变形，常用类型包括工字钢拱架、格栅拱架等。

3.2 常用支护结构适应性对比

为更清晰明确各类支护结构的适用场景，结合软岩隧道大变形等级（轻度、中度、重度），对常用支护结构的适应性进行汇总对比，详见表1。

表1 常用支护结构的适应性进行汇总对比

支护结构类型	适用条件	技术要点	加固效果

加大预留变形量+锚杆+工字钢	强风化、中等应力软岩段； 50mm<累计变形≤200mm的中度变形区；川西隧道拱脚易失稳区域	预留变形量（200-300mm），锚杆（3-4m），选用 I18-I20 工字钢，间距 60-80cm；锁脚锚管采用φ42mm、长度 4-6m，每榀拱架设置 4-8 根；喷混厚度 20-26cm，包裹拱架形成组合结构	初期抗变形能力强，拱脚稳定性显著提升；能快速承担围岩压力，控制变形速率；但整体协调性较弱，易出现局部应力集中导致局部破损
长/短锚杆（管）组合+钢拱架+喷射混凝土+工字钢	强风化、高应力软岩段； 150mm<累计变形≤300mm的中-重度变形区；川西核心破碎带边缘区域	预留变形量（300-400mm），长锚杆/管（6-9m）与短锚杆/管（3-4m）间隔布置，钢拱架间距 50-80cm，锁脚锚管采用φ76（89）mm、长度 6m，每榀拱架设置 8 根	承载与变形协调能力均衡，主动控制高应力软岩变形；组合结构整体稳定性好，变形控制精度高；能有效避免支护结构开裂、侵限，适应中-重度变形需求
管棚/小导管超前注浆+长/短锚杆/管组合+双层工字钢+后期径向注浆	极风化、破碎带、高应力富水软岩段；累计变形>300mm的重度变形区；川西龙门山断裂带影响区域	预留变形量（>400mm），超前采用φ76-108mm管棚（长 9-15m）或双层φ42mm小导管（长 3-5m）；核心支护采用长锚杆/管（6-9m）与短锚杆/管+双层工字钢+（6-9m）锁脚锚管采用φ89（108）mm；后期径向注浆在初期支护完成后 7-10 天进行，补强支护间隙	超前加固围岩，阻隔地下水效果显著；后期注浆补强消除施工缺陷，形成完整支护体系；变形控制效果达 90%以上，能保障重度变形区施工安全与长期稳定

注：续表 1。

3.3 联合支护结构核心优势

从表 1 可知，联合支护结构通过超前预处理+核心支护承载+后期补强的递进式设计，实现了与软岩隧道不同大变形等级的精准适配，核心优势体现在三方面，适配性广，可通过调整管棚/小导管、核心支护参数及注浆工艺，覆盖从中度到重度变形区的各类复杂软岩工况，尤其适用于富水破碎带、断裂带等极端复杂地质区域；打破单一支护结构“被动承载”的局限，通过超前注浆加固围岩、双层工字钢、长短锚杆/

管组合方式主动约束变形、后期注浆填充间隙，变形控制效果较传统支护提升；核心支护与围岩形成协同承载体系，结合后期注浆形成完整的支护-围岩共同体，有效降低局部应力集中风险，不仅能保障施工安全，更能满足隧道长期运营的稳定性需求，避免后期病害整治。

4 工程案例分析

4.1 工程概况

选取川西高速某在建隧道为研究对象，该隧道穿越龙门山断裂带影响区的志留系软质页岩地层，隧道埋深 80-120m，开挖断面面积 108 m²，属于典型的高应力挤压型软岩隧道。现场勘察表明，该段岩体饱和抗压强度仅 2.3-3.5MPa，遇水软化系数 0.42，天然含水量 18%-22%；实测原岩水平应力是垂直应力的 1.8-2.2 倍，符合川西高速“水平应力主导”的应力特征。隧道开挖后，呈现显著的“边墙收敛大于拱顶沉降”特征，初期采用“喷射混凝土+普通锚杆+工字钢”常规支护方案，开挖后 7 天拱顶累计沉降 62mm，边墙收敛达 180mm，边墙收敛量是拱顶沉降的 2.9 倍，喷射混凝土出现多条贯通裂缝（以边墙为主），钢拱架出现局部扭曲，初期支护侵限，支护结构适应性严重不足。

4.2 支护方案优化与适应性验证

结合该段“水平应力主导、边墙收敛显著大于拱顶沉降”的大变形特征及川西高速工程需求，优化采用“超前小导管注浆+边墙强化型联合支护+二次衬砌”的动态支护方案，具体优化要点如下：一是超前支护强化，选用长度 4.5m、φ42mm 的超前小导管，环向间距 40cm，边墙侧小导管注浆压力提高至 1.5MPa，注浆材料采用水泥-水玻璃双液浆，缩短凝固时间，快速提升边墙前方围岩的承载能力；二是核心支护差异化设计，钢拱架选用 I22b 工字钢，间距加密至 50cm，边墙钢拱架增设横向联系筋，增强抗扭曲能力；采用“长 6m+短 3.5m”长短锚杆间隔布置，边墙区域以长锚杆为主，间距加密至 45cm，且与钢拱架满焊固定；喷混厚度边墙取 26cm、拱顶取 22cm，实现差异化防护；三是锁脚与预留变形优化，锁脚锚管采用 φ89mm、长度 6m，边墙每榀拱架设置 8 根锁脚锚管，采用双角度锚固；四是二次衬砌时机把控，严格遵循“围岩变形稳定后施工”原则，通过监控量测确认边墙收敛速率降至 0.2mm/d 以下、累计收敛量达到预计值的 90%后，再施工二次衬砌，且边墙二次衬砌厚度增加至 60cm，提升长期抗变形能力。

4.3 效果分析

通过现场监测,优化方案实施后,拱顶累计变形最终稳定在 220mm,边墙收敛 150mm,均控制在规范允许范围内(结合该隧道断面尺寸及软岩等级,允许拱顶沉降 $\leq 250\text{mm}$ 、边墙收敛 $\leq 180\text{mm}$);支护结构应力监测显示,钢拱架最大应力 180MPa(I22b 工字钢屈服强度 235MPa),喷射混凝土最大应力 3.2MPa(喷射混凝土设计强度 4.5MPa),均未超过材料强度限值,支护结构未出现裂缝、扭曲、侵限等问题。该案例充分验证,针对水平应力主导型软岩大变形特征优化的联合支护方案,其各项支护参数均与大变形类型、地质条件高度适配,既满足现场施工可行性要求,又能有效控制软岩大变形,凸显了支护参数设计的合理性和可行性,可为川西高速及同类高应力挤压型软岩隧道的支护设计提供参考。

5 支护结构适应性优化建议

5.1 基于变形等级精准设计

施工前应通过地质勘察与超前探测,明确隧道沿线软岩的物理力学参数与变形等级,结合表 1 针对性选择支护方案,核心遵循“分级适配、按需强化”的大体原则,初级大变形,采用“先柔后刚、先放后抗”的设计思路。此阶段重点通过增大预留变形量,为围岩初期变形提供充足空间,避免支护结构过早承受过大压力。中级大变形,践行“控制变形、及时封闭”的设计理念。在初级大变形支护措施的基础上,进一步优化结构设计。增设长、短锚杆组合体系,短锚杆快速锚固表层围岩,长锚杆深入稳定岩层提供长期支撑,结合加密钢拱架间距,实现对变形的精准控制,防止变形持续发展。强烈大变形采取“主动适应+强支撑”的设计策略。此阶段需兼顾变形适应性与支护承载能力,在中级大变形支护措施的基础上,增设双层初期支护,大幅提升支护结构的抗变形与承载性能;同时结合仰拱加深、长短锚杆组合体系,配合超前支护预处理围岩,主动改善围岩力学性能,形成“超前加固-主动适应-强力支撑”的完整防护体系,保障隧

道施工与运营安全。

5.2 强化支护结构协同性

避免单一结构独立受力,确保各支护结构形成整体。锚杆应与钢拱架焊接固定,喷射混凝土需覆盖钢拱架与围岩表面,填充岩体裂隙;二次衬砌施工时机需结合围岩变形监测结果,待变形稳定后及时施工,形成“初期支护+二次衬砌”的双重保障。

5.3 建立动态监测与调整机制

软岩隧道大变形具有时效性、不确定性,要创建起覆盖拱顶沉降、边墙收敛、支护应力的动态监测体系。尤其其中~重度软岩隧道大变形区段,应充分结合监控量测情况动态调整支护参数,当监测得到的变形速率增大或者超过预警值时,要及时改变支护参数,加密钢拱架、增加短、长锚杆或提前施作二次衬砌,保证支护结构一直适应围岩变形的要求。当监测数据显示变形量达到预估总变形量的 1/3 的时候,马上启动一级响应,核心强化拱脚稳定性,增加 $\phi 76-108\text{mm}$ 锁脚锚管,每榀钢拱架的锁脚数量增至 8 根,同时加密监测频率到每 4 小时 1 次;当变形量达到预估总变形量的 1/2 的时候,启动二级响应,在一级响应的基础上提高支护强度,增加第二层工字钢并用纵向 I14 工字钢焊接加固。除常规监测外,增设掌子面位移监测点,掌子面挤出变形 $> 50\text{mm}$ 时,同时加强超前支护,将小导管更换为 $\phi 89\text{mm}$ 管棚(长度 9-12m),提高围岩预处理效果。

6 结论

综上所述,软岩隧道大变形段的支护核心是实现承载能力与变形协调的平衡。单一支护结构因自身特性限制,适应性较差;不同变形等级的软岩隧道需采用差异化支护方案,特殊复杂地质区域需强化支护针对性。软岩隧道大变形段支护结构的适应性并非依赖单一高强度结构,而是取决于分级适配、联合加固、动态调整的综合设计思路,通过支护方案与地质条件、变形等级的深度匹配,可实现大变形的有效控制,为同类工程提供技术参考。

参考文献:

- [1] 江国伟,王安民,何佳银,等.基于双层高强钢架初期支护的软岩隧道大变形处治技术[J].现代隧道技术,2025,62(S1):960-969.
- [2] 何伊琦.高地应力软岩隧道大变形控制技术研究[J].科技创新与应用,2025,15(26):99-102.
- [3] 伍修胜.高原铁路软岩隧道大变形控制技术及施工方法研究[J].现代工程科技,2025,4(15):157-160.