

# 铁路隧道大变形段落施工技术研究

柳亚东

成兰铁路有限责任公司 四川 成都 610036

**摘要:** 隧道埋深大、围岩较差、IV围岩以上(软弱围岩), 应力较高, 水平主应力对隧道围岩的变形有很大影响; 围岩强度应力比小于3.5时, 属极高地应力状态, 隧道围岩易发生大变形, 隧道围岩大变形控制是目前国内外隧道修建的重大技术难题。在当前设计、施工中主要存在以下问题: 设计阶段难以准确判定大变形发生的段落及等级, 常规施工工法、工艺与大变形控制不相适应, 机具设备配置不合理, 效率低、质量差, 无法及时发挥支护措施作用。本文对隧道高地应力大变形地段施工技术进行了叙述; 以某段工程为例, 讲述了大变形施工技术在实际工程当中的应用。

**关键词:** 高地应力; 软岩; 大变形; 施工技术

## 1 工程概况

成兰铁路杨家坪、茂县、平安隧道位于四川省阿坝州境内, 测区受断裂带区域构造的影响, 大地构造条件极其复杂。区内主要发育存在多条向斜、背斜, 隧道洞身主要穿越地层岩性为千枚岩、灰岩、砂岩、板岩; 线路所经局部段落隧道埋深较大、应力场较强, 软弱围岩段落可能发生大变形<sup>[1]</sup>。

## 2 高地应力大变形产生的原因

高地应力软岩大变形段落主要为陡倾状绿泥石千枚岩, 开挖中变形规律如下: ①变形受产状控制明显, 基本为垂直岩面挤出, 一般情况下边墙变形均大于拱部沉降, 最大可达3倍以上。由于边墙变形大, 分台阶开挖时, 极易出现台阶分步鼓出破坏现象。②监控量测显示围岩变形能较均匀发展, 支护不足条件下难以收敛, 但较少发生位移突变或塌方等情况。③当围岩较完整时, 仰拱施作支护成环后, 变形基本趋于收敛, 变形能得到控制, 流变现象不显著。

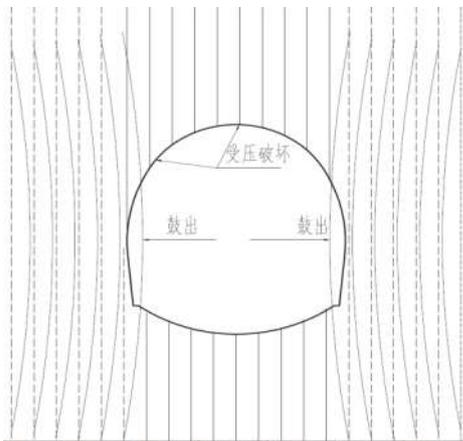


图1 陡倾薄层千枚岩开挖变形模式示意

成兰铁路隧道大变形属于典型的结构型大变形, 即

在高地应力区卸荷条件下, 层状岩体发生垂直与层面的弯曲折断破坏, 造成支护变形及破坏。

## 3 高地应力大变形等级分类

以强度应力比为基础, 结合原始地应力、相对变形量将变形划分为“轻微、中等、严重、极严重”四个等级。

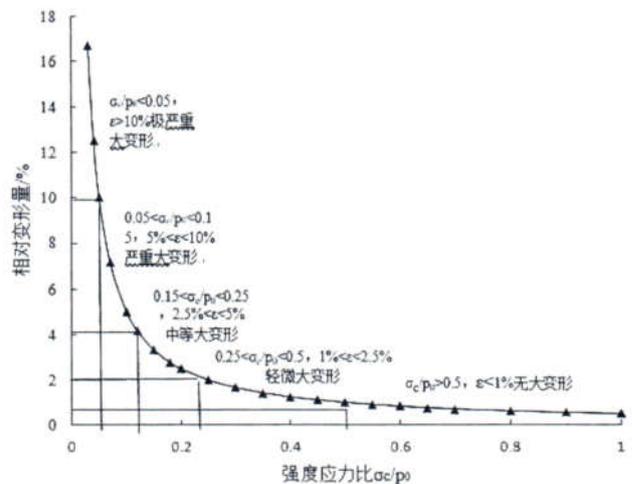


图2 大变形强度应力比及相对变形量示意图

表1 成兰铁路大变形分级标准

分类依据	无变形	轻微	中等	严重	极严重
强度应力比 $N_c$	> 0.5	0.25-0.5	0.15-0.25	0.05-0.15	≤ 0.05
初始地应力(MPa)		< 10	10-15	15-25	≥ 25
相对变形值(%)	< 1	1-2.5	2.5-5	5-10	> 10

强度应力比 $N_b$ 按下式进行计算:

$$N_b = \frac{\sigma_{am}}{P_1}$$

式中:  $\sigma_{am}$ —单轴抗压强度;  $P_1$ —垂直于隧道的最大地应力分量;

岩体单轴抗压强度采用岩石单轴抗压强度折减确定, 折减系数参照表 2

表2 岩体强度折减系数

岩体完整性	折减系数k
完整	> 0.75
较完整	0.75 ≥ k > 0.55
较破碎	0.55 ≥ k > 0.35
破碎	0.35 ≥ k > 0.15
极破碎	k ≤ 0.15

地应力方向与隧道走向交角对地应力的修正，可按下列公式进行。

$$P_0 = \beta_1 \sin\psi + \beta_2 \cos\psi$$

式中： $\beta_1$ 为最大主应力值、 $\beta_2$ 为最小主应力值、 $\psi$ 为最大主应力与隧道走向交角。

现场尽可能实测原始地应力，同时及时取样进行岩石强度等测试。在取得充分数据后，通过上述判定方法，对现场变形等级进行判断。本隧大变形段落埋深445~590m，上覆岩层容重(约为2.8g/cm<sup>3</sup>)估算的垂直主应力为10.35~16.11MPa，最大水平主应力为22.85~32.12MPa，最小水平主应力为13.7~19.1MPa。根据以上数据得出岩体强度应力比( $R_b/\beta_{max}$ )= $8 \times 0.4$ (岩体折减系数)/(23.54~31.22)=0.10~0.14，故以严重大变形为主，局部为中等大变形。

#### 4 高地应力软岩大变形施工技术

从提高围岩自身承能力出发，通过“长大锚杆+注浆为主的主动控制体系”，控制围岩变形区域的发展。施工阶段按照主动控制变形的理念，加深地质预报、强化锚杆、加强工法配套、优化施工措施，并执行“四大快字诀”，即快速开挖、快速支护、快速锚杆注浆、快速封闭成环。

##### 4.1 加深地质工作

开展针对性地应力测试，推荐采用水压致裂法。现场通过掌子面取样，超前钻孔取样，进行岩石测试。根据加深地质成果，对大变形设计进行动态调整<sup>[2]</sup>。

##### 4.2 强化锚杆施工

大变形段应加强锚杆施工效率及锚固力的及时性，实现主动加固围岩，限制变形扩展。

① 合理选择锚杆类型：3.5m以内短锚杆可以采用快硬水泥或树脂锚杆；5m以上长锚杆应采用中空锚杆；塌孔地段采用自进式锚杆。

② 合理配置机械设备：锚杆施工应采用大型机械设备如凿岩台车或专业锚杆钻机，提高钻进效率，避免施作角度等限制。

③ 长短结合，先短后长：变形发展较快、较严重段落，可通过快速施工短锚杆，控制初期变形，再施作长锚杆，长短锚杆交错布置从而形成群锚效应。

④ 快锚固，早承载：短锚杆采用快硬水泥、树脂锚固剂等快速锚固，长锚杆采用快凝浆液。

⑤ 优化锚杆参数：通过地质雷达、声波测试法等探明松动区，优化锚杆参数。

##### 4.3 加强工法配套

尽可能减少开挖分部、钢架接头等工序衔接薄弱环节，初支尽快封闭，具体工法详见下表：

表3 高地应力大变形地段建议工法

变形等级	建议工法	备注
轻微、中等	两台阶(下台阶带仰拱)	
严重、极严重	两台阶(下台阶带仰拱)	
	台阶法+临时仰拱	
	掌子面无自稳能力的可采用三台阶预留核心土	

##### 4.4 优化施工措施及工艺

扩大超前支护范围至边墙；加强钢架纵向连接；钢架接头上下部位采用型钢等连接方式。优化锁脚锚杆布置：锁脚方向应与变形优势方向一致，并采用快凝浆液快速锚固。

##### 4.5 注浆加固围岩

在施作初期支护时，预留注浆空，根据变形速率，适时对围岩进行注浆加固，填充初支背后空隙。

##### 4.6 隧道监控量测

① 位移监控量测：每台阶均应设置变形量测点，各监测点应以绝对位移显示。

② 结构受力监控量测：每个等级的变形段宜设置2处结构受力监测断面。

③ 大变形段监控量测应及时有效，并有足够的监测频次。

##### ④ 分步工序控制基准。

施工过程中对分步变形量进行控制，利于工序衔接并控制洞周协调变形，若正常施工无法达到对应控制值则应考虑加强支护。变形控制基准见下表：

表4 单线隧道施工过程控制基准

变形等级	施工方法	轻微		中等		严重	
		比例	控制值(cm)	比例	控制值(cm)	比例	控制值(cm)
两台阶法	下台阶施工前	35%	5-9	25%	6-9	23%	8-10
	仰拱施工前	50%	8-13	45%	11-16	43%	15-19
	仰拱施工后	15%	2-4	30%	8-10	34%	12-15
三台阶法	中台阶施工前	58%	9-15	50%	13-18	45%	16-20
	下台阶施工前	22%	3-5.5	25%	6-9	30%	10.5-13.5
	仰拱施工前	15%	2-4	18%	4.5-6	15%	5-7
	仰拱施工后	5%	1-2	7%	1.5-2.5	10%	3.5-4.5

表5 双线隧道施工过程控制基准

变形等级		轻微		中等		严重	
施工方法		比例	控制值 (cm)	比例	控制值 (cm)	比例	控制值 (cm)
两台阶法	下台阶施工前	38%	8-11	30%	9-15	27%	13.5-21.6
	仰拱施工前	55%	11-17	50%	15-25	48%	24-38
	仰拱施工后	7%	1.5-2.5	20%	3-5	25%	12.5-20
三台阶法	中台阶施工前	52%	10.5-15.5	50%	15-25	45%	22-36
	下台阶施工前	35%	7-10.5	28%	8-14	26%	13-21
	仰拱施工前	10%	2-3	15%	4.5-7.5	17%	8.5-13.5
	仰拱施工后	3%	0.5-1	7%	2-3.5	12%	6-9.5

## 4.7 位移等级管理

大变形地段实际变形值是反映施工安全、工程措施效果、结构安全性等的重要指标,大变形地段应加强位移监控管理,并拟定应急处理措施。大变形管理等级见下表:

表6 大变形段监控量测位移控制等级

序号	判断标准	控制等级	应急处理措施
1	累积变形达到设计50%,变形速率超5mm/d	I	1、加强监测频次; 2、各方现场进行危险评估。
2	累积变形达到设计80%,变形速率超10mm/d	II	1、前方暂停掘进; 2、支护补强; 3、各方现场进行危险评估。
3	累积变形达到设计95%; 变形速率超5mm/d	III	1、对变形段增设护拱; 2、加强临时横撑或其他支护加固措施; 3、措施失败,各方分析失败原因; 4、对变形段处理完成后调整前方支护措施。

## 4.8 二次衬砌施作时机

根据现有研究成果,单线、双线隧道的轻微、中等、严重、极严重等级的大变形推荐二衬施作时机详见下表:

表7 二次衬砌施作时机统计表

隧道断面	大变形等级	变形速率准则
单线隧道	轻微	拱顶下沉速率达到0.2mm/d、边墙收敛速率达到0.5mm/d
	中等	拱顶下沉速率达到0.2mm/d、边墙收敛速率达到0.5mm/d
	严重、极严重	拱顶下沉速率达到0.2mm/d、边墙收敛速率达到0.6mm/d
双线隧道	轻微	拱顶下沉速率达到0.2mm/d、边墙收敛速率达到0.5mm/d
	中等	拱顶下沉速率达到0.2mm/d、边墙收敛速率达到0.5mm/d

表8 高地应力软岩大变形段落技术参数

序号	项目名称	轻微大变形	中等大变形	严重大变形	极严重大变形
1	预留变形量	20cm并与施工工序匹配	35cm并与施工工序匹配	圆形轮廓(内轮廓半径5.1m)	暂无支撑数据
2	断面形式	近圆形轮廓(优化仰拱曲率)	近圆形轮廓(优化仰拱曲率)	一层25cm,二层15cm	

续表:

隧道断面	大变形等级	变形速率准则
	严重、极严重	拱顶下沉速率达到0.3mm/d、边墙收敛速率达到0.6mm/d

## 4.9 软岩大变形施工要点

## ① 锚杆施工要点

锚杆在隧道大变形控制施工中起着重要作用,但锚杆也是最难控制质量的工艺之一,主要存在施工不及时、进度慢、质量差等问题,造成变形控制效果差,甚至由于工效过低,错失变形控制时机导致变形恶化,引起人们对锚杆的作用疑问。因此如何切实发挥锚杆作用是控制大变形的关键。保证钻孔施工质量及效率:目前现场大量采用手持气动锚杆钻机难以保证钻进速度、深度以及施作角度,长钻孔成孔后人力难以插入锚杆,对施工质量产生极大影响。因此长锚杆施作必须使用锚杆台车快速成孔,减少施作时间。

施作时机控制:锚杆理论上应在开挖后尽早施作,但实际操作中难以实现,特别是长锚杆这是由于长锚杆人工难以施作,开挖初期受空间限制,大型机械一般无法到达掌子面,可采用如下方法解决:调整锚杆类型由于开挖初期,松动圈处于发展初期,范围相对较小,这时采用短锚杆能达到控制初期变形的效果,后期松动圈发展过程中把控好长锚杆的施作时机<sup>[3]</sup>。

锚杆锚固效果控制:一般砂浆锚杆需浆量较少,而水泥砂浆却无法少量调配,加之现场锚杆往往又成批施作,因而影响了锚固最佳时机。而且大变形段施工初期变形发展迅速,往往达10cm/d以上,钻孔可能发生缩孔使灌浆效果变差,砂浆凝结过程中变形持续发展,杆体与砂浆粘结效果差,锚固效果差。可采用如下方法进行控制:采用速凝药包锚杆或树脂锚杆,药包或树脂锚杆能在极短时间达到设计锚固力,且无需成批调配,可单孔施作,施作质量受现场施工影响少,在初期变形发展极快的段落还可采用涨壳式锚杆。采用特殊速凝浆液。长锚杆采用药包或树脂锚杆难以实现全长粘结,故仍需采用注浆方式进行锚固。采用快凝早强注浆材料实现锚杆快速锚固受力,避免浆液缓慢凝固造成的粘结效果差的问题。快凝浆液终凝时间宜控制在15min左右。

② 高地应力软岩大变形段落技术参数,如表8所示。

续表:

序号	项目名称	轻微大变形	中等大变形	严重大变形	极严重大变形
3	喷砼	C30早高强喷吐, 23cm厚	C30早高强喷吐, 25cm厚	C30早高强喷吐, 25cm+21cm厚	
4	钢架形式	I18型钢, 0.8 / 榀	H175型钢, 0.6 / 榀	双层H175型钢分次施作, 0.6m / 幅, 接头处加强纵向连接	
5	钢架锁脚	φ42钢花管 (4.0m)	φ42钢花管 (5.0m)	加密锁脚, 树脂 (药包) 锁脚或φ32自进式锚杆 (6.0m)	
6	锚杆形式	拱部90°。范围φ22组合中空, 其余拱部边墙墙φ25中空锚杆4m)间距1.2×1.0 (环×纵)	拱部90°。范围φ22组合中空, 其余拱部边墙墙φ25中空锚杆6m)间距1.2×0.8 (环×纵)	长短结合, 树脂 (药包) 锚杆 (4.0m)+边墙R32自进式锚杆 (10m)	
7	钢筋网	全环φ8钢筋网 (20mm×20 mm)	全环φ8钢筋网 (20mm×20 mm)	双层全环φ8钢筋网 (20mm×20 mm)	
8	超前支护	拱部120° 范围设置φ42小导管	拱部120° 范围设置φ42小导管	拱部150°。范围设置φ42小导管	
9	二次衬砌	50cm厚钢筋砼	55cm厚钢筋砼	55cm厚钢筋砼	

**结语**

高地应力大变形地质条件为隧道施工带来诸多不确定因素, 通过对地质条件分析明确技术措施, 优化设计参数, 并对大变形段落纳入“动态设计、动态管理”。杨家坪、茂县、平安隧道采取的措施确保了施工期间的安全, 最大限度避免了侵限换拱现象, 进度质量得到了保障。

**参考文献:**

- [1]郭砚海.软岩隧道变形控制施工技术探讨[J].建筑工程技术与设计, 2014 (33) .145.
- [2]张梅.高地应力软岩隧道变形控制设计与施工技术[J].现代隧道技术, 2012, 49 (6) : 13-22.
- [3] 鲜国, 印建文.成兰铁路隧道建造关键技术与实践[J].隧道建设 (中英文),2018 (10): 20-22.