乌鞘岭隧道高地应力软岩大变形控制设计技术
The Design Technology of Controlling High Crustal Stress Soft Rock's Large Deformation in Wuqiaoling Tunnel

朱永全[1] 李国良[2]

1 石家庄铁道学院 2 铁道第一勘察设计院

摘 要：乌鞘岭特长隧道岭脊区段隧道覆土埋深大，区域性大断层组成的宽大挤压构造带围岩破碎软弱，施工挤压大变形显著。通过选择合理的断面形状、预留合理变形量、多重支护、适当提高衬砌刚度的柔性结构设计，短台阶或超短台阶快开挖、快支护、快封闭和衬砌适时施作的施工技术，成功控制了隧道大变形。

关键词：高地应力 大变形 软岩 控制 设计

Zhu Yongquan1 Li Guoliang2

(1 Shijiazhuang Railway Institute, 2 the First Survey and Design Institute of China Railway)

Abstract: The embed depth of earth covering and crustal stress are large in the mountain crest section of Wuqiaoling lengthy tunnel. The extrusion tectonic wall rock that composed with regional fault is soft and broken in this section, and the extrusion deformation is also obviously during construction. Based on selecting rational cross-section figure, preformed rational deformation, multiple supports, the flexible structure design that increased the liner's stiffness, the tunnel's large deformation is controlled triumphantly. The construction technology that contains short-step excavation method, fast support, constructing liner in time, is also accepted to control the tunnel's large deformation.

Key word: high crustal stress, large deformation, soft wall rock, control, design

1 乌鞘岭隧道岭脊段工程概况

乌鞘岭特长隧道是兰新铁路兰州至武威段增建二线工程的关键枢纽，设计为两座单线隧道，主体埋深 400 ～1100m，左右两线间距 40m，隧道长 20. 05km，为我国已建成的最长单线铁路隧道。岭脊区段隧道覆土埋深 500～1100m，实测垂直地应力 9.15~20.5MPa，水平横向地应力 16~17.5MPa，地应力高。隧道穿越 F4、F5、F6、F7 四条 7587m 范围分布的区域性大断层组成的宽大“挤压构造带”，岩性主要为志留系板岩夹千枚岩、千枚岩和压性断层破碎的泥砾及碎裂岩。实测围岩饱和单轴抗压强度 0.703～0.806MPa，围岩强度低。围岩强度应力比仅为 0.031～0.040。高地应力软岩区段施工挤压大变形显著，变形控制困难，计划工期 2.5 年，时间紧、任务重。这对隧道工程的设计理念、设计施工技术都是都是一次空前的挑战。

2 挤压性围岩的隧道设计理念

挤压性围岩的隧道设计理念，主要可归纳为减轻作用在支护结构荷载而容许位移的方法和为了控制松弛而尽可能早地控制位移的方法，即所谓的柔性结构设计和刚性结构设计，两者的设计理念是完全相反的。

2.1 柔性结构设计理念

（1）先行导坑法，即先掘进比较长的导坑，通过位移释放一部分初始地压，可减轻作用在扩挖时的支护变形和构件中的应力。概念上是通过导坑发生先行位移，结果是推迟了支护结构的设置时间，从而减轻了作用在支护结构上的地压。

（2）多重支护方法

为了具有确保设置多层支护的变形富余，而在掌子面先设置第一层支护，而后在距掌子面后方 3.0D 以上的位置设置第二层支护，使隧道稳定的方法，基本上是不进行顶替的方法。本方法的概念是一次支护发生屈服，但闪设置二次支护，地压和支护反力得到平衡。

（3）可缩式支护方法

隧道开挖后及时施作支护，防止围岩松弛，隧道围岩压力增大，通过可缩式锚杆、可缩钢架等支护体系可形成更大的变形，释放围岩压力，保持支护结构完整的围岩压力与支护抗力平衡。

（4） 分阶段综合控制法

系统锚杆和补强锚杆围岩加固，用锚杆分阶段控制围岩部分位移。同时钢架、分层喷射混凝土支护，分层施作二次衬砌。仅仅用设置的支护闪刚性不足，难于控制位移，因此，为了提高支护刚性，分阶段地提高支护刚性来控制位移，使隧道趋于稳定。

2.2 刚性结构设计理念

(1)大刚度支护和衬砌结构

采用掌子面超前长大锚杆和周边系统长大锚杆、大型钢架和大厚度喷射混凝土支护。该方法采用刚性更大的支护结构，来控制位移。也有在掌子面附近 3m 左右，浇注仰拱，甚至模筑混凝土结构到达早期闭合的工例。

(2)大范围围岩加固法

采用超前注浆或旋喷支护，深孔大范围注浆加固补强隧道周边和掌子面前方的围岩，力求在减轻支护土压的同时，使掌子面附近早期闭合而控制位移的方法。

2.3 乌鞘岭高地应力软岩区段隧道设计思想

上述挤压性围岩设计理念都是先进的设计思想，都有一些成功工程实例。从技术、经济、工期等综合指标出发，上述各设计理念都有一定的适用性。刚性设计法仅在小埋深、低地应力的软岩技术上可行、经济上合理，而柔性设计的先行导坑法、多重支护法、可缩式支护法和分阶段综合控制法其基本理念是相同的，都是容许围岩变形，释放地应力，减低支护压力，同时又能约束围岩松弛和过分变形，保持隧道稳定的目的。但在技术手段上又有各自差异，从经济、工期上具有较大差距，例如先行导坑应力释放法虽然扩挖隧道施工经济，但导坑本身施工仍然困难，增加支护工程量大；可缩式支护结构工艺复杂，技术要求高，施工工期较长。

针对乌鞘岭隧道高地应力软岩区段实际情况，采用柔性结构设计理念分阶段综合控制法。即首先选择合理的断面形状，留足预留变形量，短锚管超前支护，中等长等系统锚杆和少量补强锚杆围岩加固，多重支护，适当提高衬砌刚度和提前施作衬砌。

3 F7 断层区段隧道结构设计

3.1 迂回导坑的马蹄形断面

在 F7 断层带左、右线正洞施工受阻后，增设小断面施工迂回导坑，以便顺利通过 F7 断层带进入岭脊地段施工，并为正洞提供有关设计、施工参数，指导正洞施工。

为进行断面形式和支护参数的对比，选择两种断面大小和形状、三种不同设计支护形式和参数。

（1）马蹄形小断面（开挖断面 7.48m×7.01m），全断面初喷 C20 混凝土厚 25cm，全断面设 2 榀/m 的 I20 型钢钢架。拱部锚杆长 4m，边墙 5m，间距 1.0m×1.0m；当变形达到 10cm 或初喷有开裂现象时，拱墙补喷混凝土 15cm，预留变形量 15cm。

（2）马蹄形小断面（开挖断面 7.48m×7.01m），全断面初喷 C20 混凝土厚 20cm，预留变形量 15cm，全断面设 2 榀/m 的 I20 型钢钢架。拱、墙锚杆长 4m，间距 1.0m×1.0m；模筑 C25 混凝土厚 40cm。

(3) 马蹄形大断面（开挖断面 10.10m×10.59m），净高 7425mm，道碴盒宽度按设置板式道床为 2900mm，边墙部位轮廓适当加大曲率，改善受力性能。全断面喷混凝土厚 25cm ；3 榀/2m 的 I20 钢架；拱部锚杆长 4m，边墙锚杆长 6m；一次预留变形量 8cm。一次初期支护完成后，通过监控量测，在收敛量达到 16cm 或喷混凝土有开裂等现象时，补喷混凝土厚 10cm；二次支护后预留变形量 20cm。C30 钢筋混凝土厚度 65cm 一次施做。

3.2 多重支护圆形断面复合式衬砌结构

（1） 一次大刚度支护、小刚度二次衬砌并预留衬砌补强空间

开挖断面直径 10.36m，初期支护厚 35cm，二次衬砌采用 50cm 的钢筋混凝土结构，预留两侧边墙衬砌补强空间。

（2） 多重支护、大刚度二次衬砌结构

开挖断面直径 11.86m，采用分层二次支护，边放边抗的设计原则，初期支护分两层(25+20cm)，二次衬砌采用 80cm 的钢筋混凝土结构，如图 1 所示。

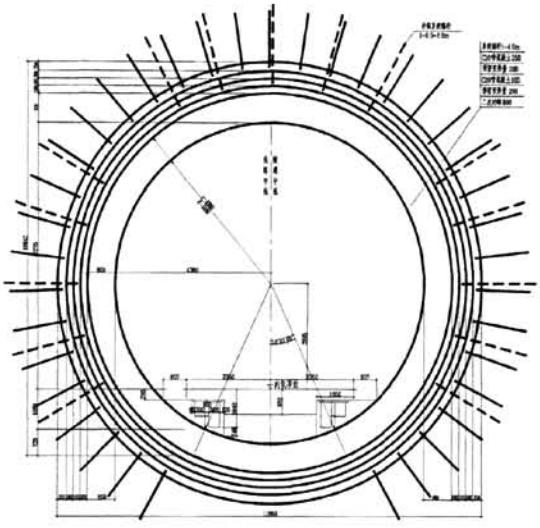


图 1 分层二次支护和加强衬砌

3.3 多重支护椭圆形断面复合式衬砌结构

椭圆形开挖断面 7.20m×8.64m，采用分层二次支护，边放边抗的设计原则，初期支护分两层(25+20cm)，二次衬砌采用 50cm 并预留 30cm 衬砌补强空间的钢筋混凝土结构。

3.4 优化结构形式

根据 F7 断层的变形和地质情况，进行了大量断面形式、断面净空、支护形式和支护参数优化，分别采用了圆型、椭圆型、马蹄型的不同断面形式，一次大刚度支护及分层多次支护，一次二衬及分层两次二衬等支护、衬砌形式，经施工实践证明正洞隧道以圆形断面形式为最好；适当加强第一次支护刚度的多重支护，较大刚度的钢筋混凝土衬砌，如图 1 所示。

4 岭脊其它高地应力软岩区段隧道结构设计

(1)椭圆形断面不同参数复合式衬砌对比试验

根据岭脊高地应力软岩区段地质和变形情况，进行了大量的断面净空、支护形式和支护参数现场试验与优化，椭圆形断面如图 2 所示，支护结构参数如表 1 所示。

表 1 不同支护形式和参数

净空断面	初期支护								二次衬砌		备注
	湿喷混凝土	锚杆			钢筋网			钢架榀/m	预留变形量 cm	拱墙 cm	仰拱 cm	
		位置	长度 m	间距 m	位置	直径 mm	间距 cm					
6.23×7.692	20（素）	拱墙	3.5	1	拱墙	Φ8	25	1 榀/m	12	40	40	格栅
	15（素）	拱墙	3	1	拱墙	Φ8	25	1 榀/m	8	40	40	格栅
	25+10（素）	拱墙	3.0	1.0	拱墙	Φ8	25	1.5 榀/m	25	40	40	工 20
	25+15（素）	拱墙	4.0~6.0	1.0	拱墙	Φ8	25	1.5 榀/m	25	40	40	工 20

6.7×7.721	25（钢纤维）	拱墙	4.0～6.0	0.8	拱墙	Φ8	25	3.0榀/2m	35～55	50	50	H175
	25（钢纤维）	拱墙	4.0～6.0	0.8	拱墙	Φ8	25	1榀/0.8m	25	50	50	工20
	25＋10（素）	拱墙	4.0～6.0	0.8	拱墙	Φ8	25	1榀/0.8m	25	50	50	工20

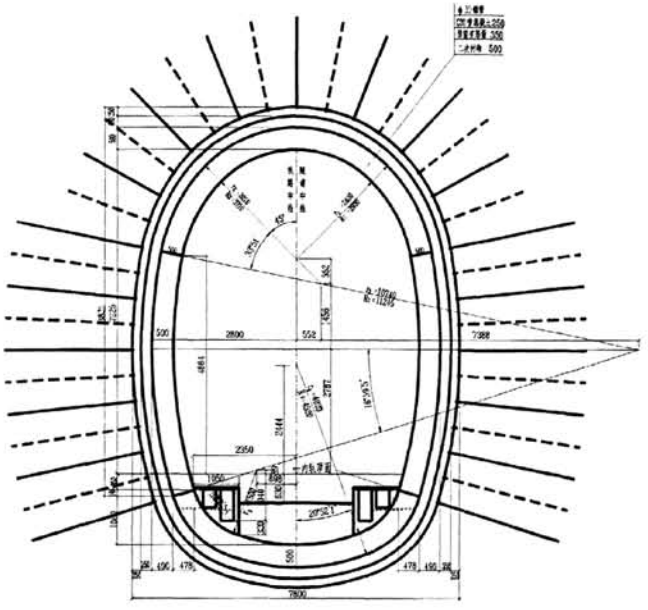


图2　岭脊地段典型断面

(2)最终优化结构形式

根据岭脊高地应力软岩区段地质和变形情况，在大量现场试验和支护参数优化后，最终采用椭圆形断面如图2所示，支护结构参数如表2所示，即一次支护25cm，预留变形量25~35cm等作为多重支护，大刚度钢筋混凝土衬砌。

表2　推荐支护参数

地质情况	初期支护				钢架	预留变形量cm	二次衬砌	附注
	混喷砼cm	锚杆(管)		钢筋网				
		长度m	间距m	位置				
千枚岩为主、板岩千枚岩互层	25	Φ32mm锚管 拱4m 墙6m	0.8	拱墙	H175 1榀/0.8m	35	50cm 钢砼	埋深600m以下地段采用Φ22mm锚杆
板岩为主	25	Φ22mm锚杆 拱4m 墙6m	1.0	拱墙	H175或I20 1榀/m	25	50cm 钢砼	

5 适时衬砌变形控制与结构安全

衬砌结构形式与作用在不同围岩地质条件下是不同的，其刚度也不同。衬砌结构的设计应满足实现工程经济、安全与耐久性要求。在坚硬良好围岩地质条件下，支护结构可实现洞室稳定，小刚度衬砌结构仅作为安全储备；而在一般围岩地质条件下，支护结构仅能暂时或相对短期保持洞室稳定，往往以支护和较大刚度衬砌复合式结构共同作用。为保证衬砌结构安全，往往推迟二次衬砌时机，以达到充分发挥围岩自承作用，尽量减小二次衬砌围岩压力分担比例的目的。

高地应力软岩地质条件下，特别是围岩强度应力比极低时，围岩压力大，流变特性显著，隧道变形持续时间长，可缩式或多重支护可有效控制隧道变形，但很难稳定隧道变形，隧道变形往往持续数周乃至几年。因此，大刚度衬砌适当提前施作是稳定隧道变形的经济和有效方法。适当提前施作二次衬砌，合理施作时机十分重要。衬砌施作时机应考虑将围岩压力大部分释放，衬砌围岩压力分担比例应降低到总压力的70%以下，同时，在考虑围岩蠕变、结构可靠性和耐久性前提下，经理论分析、现场监测等综合手段进行确定。在乌鞘岭工程实践中衬砌施作时机为隧道全位移达隧道极限围岩的65%~80%以后，施工实测位移与隧道极限位移比值达43%~55%，位移速率占实测总位移比值达1.0%后。

6 结论

按实测围岩压力及接触压力对F4～F7区段最后采用的圆形断面及椭圆形断面等支护系统及衬砌断面，进行安全度，计算结果支护结构是安全的。对上述断面进行可靠度分析，也基本满足目标可靠指标要求。

通过十多家科研、设计和施工单位的艰苦实践，根据施工初期支护破坏情况及现场试验所掌握的应力释放和围岩压力作用的规律，提出加强支护刚度、合理预留变形量、多重支护，采用中长锚杆、短台阶或超短台阶快开挖、快封闭、二衬适时紧跟等措施，有效控制了隧道大变形。为成功建设国内外罕见高地应力软岩挤压大变形特长隧道提供了强力技术支持。

1. 张扯道，白继承.家竹著隧道高瓦斯、大变形、大涌水的整治与对策。世界隧道，1998(1) : 1-10
2. 喻渝，挤压性围岩支护大变形的机理及判别方法。世界隧道，1999(1):46-51
3. 陶振宇，试论高地应力区的岩体特性。地下工程，1985, 5-9
4. 白世伟，朱维申等，在高地应力区与一个大型地下电站有关的若干岩石力学问题。.岩石力学与下工:程学报，1983, 2 (1) :33-39
5. 铁道第勘察设计院，乌鞘岭隧道岭脊地段复杂应力条件下的变形控制技术研究阶段成果总报告[R]。兰州，2004. 12