

文章编号: 1674—8247(2019)04—0012—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.04.003

## 某隧道极高地应力下变形控制技术探讨

郑伟 张磊

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:**本文针对六盘水至沾益铁路三联隧道高地应力状态下凝灰岩软弱地层段出现的大变形问题,通过工程类比、数值理论分析后,采取了与之适应的施工工法、支护理念 and 设计参数,及时施做二次衬砌,较好地解决了极高地应力状态的软岩大变形问题,可为类似工程提供参考。

**关键词:**极高强度应力比;大变形;支护;数值分析;变形控制

中图分类号:U456.3<sup>+</sup>1 文献标志码:A

## Discussion on Deformation Control under High Ground Stress in a Tunnel

ZHENG Wei ZHANG Lei

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** During the construction of three-connected-arch tunnel in Liupanshui-Zhanyi railway, the large deformation occurs under high ground stress in the soft tuff stratum section. In order to solve the deformation problem under extremely-high ground stress state, the appropriate construction method, support concept and design parameter are adopted after engineering analogy and numerical theory analysis and the secondary lining is performed in time, which can provide reference for similar projects.

**Key words:** extremely-high strength stress ratio; large deformation; support; numerical analysis; deformation control

六盘水至沾益铁路三联隧道为设计速度160 km/h的双线隧道,全长12 214 m,是全线第二长隧道。隧道处于云贵高原中部低中山地貌,最大埋深约280 m,隧道通过地层为二叠系上统峨眉山玄武岩组( $P_2\beta$ )玄武岩夹凝灰岩;宣威群( $P_2xn$ )砂岩夹页岩、泥岩、炭质泥岩、煤层;三迭系下统飞仙关组( $T_1f$ )砂岩夹泥岩、页岩。全隧通过6条断层及1个向斜,纵断面如图1所示。

三联隧道1号斜井工区在玄武岩夹凝灰岩与煤系地层接触带附近(D1K 305+940~D1K 307+120)施工时,虽对支护措施进行了逐步加强,但初支变形未能

得到有效控制,平导及正洞初期支护均出现大变形,正洞甚至出现了二次衬砌开裂、隧底隆起等现象,具有典型的挤压性大变形的特点。后经对现场情况、变形原因进行分析,采用数值理论计算等方法,综合制定变形控制措施,效果良好,可为类似工程提供一定参考。

### 1 施工变形特征及原因分析

#### 1.1 施工变形特征

1号斜井工区施工揭示D1K 305+945~D1K 306+120段岩性以紫红色凝灰岩为主,局部夹玄武岩,凝灰岩全风化,施工过程中多处地段出现初期支护变形

收稿日期:2018-10-30

作者简介:郑伟(1979-),男,高级工程师。

引文格式:郑伟,张磊.某隧道极高地应力下变形控制技术探讨[J].高速铁路技术,2019,10(4):12-16.

ZHENG Wei, ZHANG Lei. Discussion on Deformation Control under High Ground Stress in a Tunnel [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(4): 12-16.

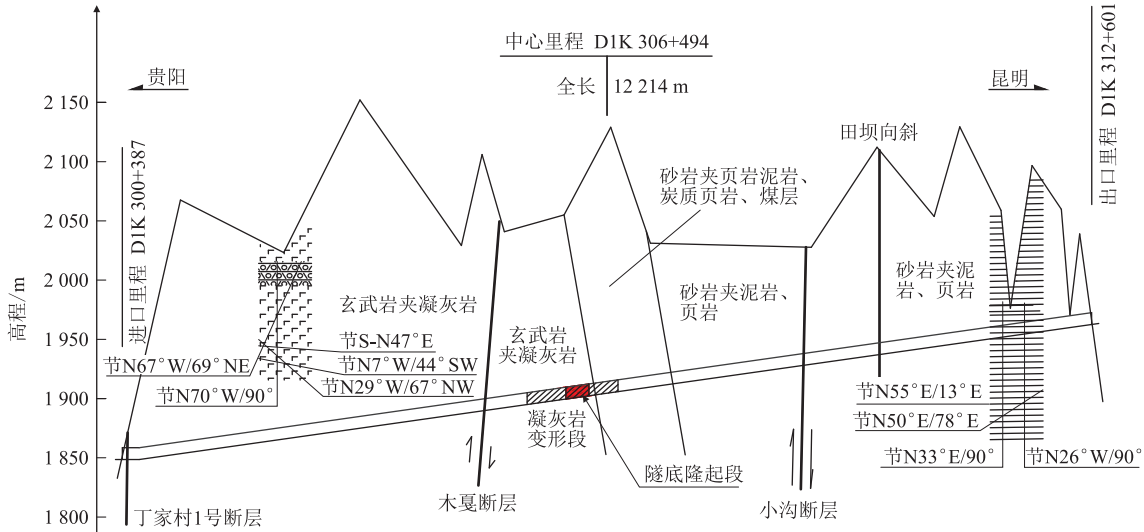


图1 三联隧道纵断面示意图

较大现象,虽对支护措施、支护刚度逐步加强,但变形依然较大。从变形特征分析,段内拱顶沉降均在17 cm左右,其周边收敛量较为突出,单侧最大收敛值约为55 cm,该段初期支护在隧道开挖后距掌子面1倍洞径范围内变形收敛仍属正常值范围,但在距掌子面1.5~2倍洞径(从时间上开挖初支后30~35 d)处,仰拱开挖后初期支护封闭成环反而极易发生边墙变形加剧,特别是填充面以上2.5 m及5.5 m两个位置;其主要表现形式为混凝土开裂、掉块;型钢钢架局部出现外突、扭(压)曲、折断现象;连接钢板螺栓剪切破坏,初期支护变形侵限严重;该变形趋势与普通软岩地段在初支成环后变形速率明显减小的变形规律不一致,具有蠕变、台阶性应力释放等特征;应力释放时间长,局部地段甚至在二衬施作完毕1年后发生隧底隆起现象。

1.2 变形原因分析

- (1)变形段地质条件复杂,位于木嘎断层和上土木断层挤压夹持区内,且位于玄武岩夹凝灰岩与煤系地层小角度不整合接触带附近。
- (2)本段隧道最大水平主应力值为6.87 MPa,线路走向与最大主应力方向呈大角度相交,且最大主应

力主要为构造应力,凝灰岩、泥页岩及煤层强度低,岩石天然单轴抗压强度平均值约为1 MPa,强度应力比为0.15,属极高强度应力比状态。

(3)全风化的凝灰岩岩体强度低,完整性差,岩质软,遇水后强度急剧降低,自稳性极差,且具有一定的膨胀性,膨胀荷载约为0.35 MPa。

2 变形控制措施探讨

2.1 支护理念对比

针对前期出现的变形情况,过程中先后按不同的大变形处理理念进行了试验:按“先放后抗、及时封闭”的原则施作A试验段,采用双层支护;按“以抗为主”的原则施作B试验段,采用刚度较大的单层支护;总结前两个试验段优缺点后施作C试验段,优化支护参数及工法,如表1~表3所示。

表1 试验段范围表

试验段	里程范围	长度/m	支护形式	施工方法
A	D1K 306+032~D1K 306+045	13	双层支护	台阶法
B	D1K 306+400~D1K 306+440	40	单层支护	台阶法
C	D1K 306+045~D1K 306+062	17	单层支护	双侧壁

表2 单层支护参数表

单层支护	预留变形量		钢筋网 $\phi 8 \times \phi 8$		锚杆			锚索 15.2 mm <sup>2</sup>		
	部位	尺寸/cm	部位	网格/cm	部位	间距/m	长度/m	部位	间距/m	长度/m
	拱墙	25	拱墙	25×25	拱部、仰拱	0.8×0.6	4	边墙	0.8×0.6	8
	喷混凝土		钢架		超前支护		衬砌厚度/材料		主筋配置	
	部位	厚度/cm	类型	间距/m	类型	间距/m	长度/m	拱墙、仰拱	规格	间距/m
	全环	25	全环 H175	0.6	$\phi 75$	6	9	55 cm/C35 钢筋混凝土	$\phi 25$	0.2

表3 双层支护参数表

双层支护	支护顺次	预留变形量		喷混凝土		钢筋网 $\phi 8 \times \phi 8$		钢架			衬砌厚度/材料
		部位	尺寸/cm	部位	厚度/cm	部位	网格/cm	部位	材料	间距/m	全环
	第一层初支	拱墙	25	全环	20	拱墙	20 × 20	全环	格栅	0.6	55 cm/C35 钢筋 混凝土
	第二层初支	拱墙	15	拱墙	25	—	—	拱墙	H175	0.6	
	支护顺次	系统锚杆			系统锚索 15.2 mm <sup>2</sup>				超前支护		
		拱部及仰拱			边墙						
		材料	间距/m	长度/m	间距/m		长度/m	类型	间距/m	长度/m	
第一层初支	$\phi 25$ 中空锚杆	0.8 × 0.6	4	0.8 × 0.6		8	$\phi 75$	6	9		

从各试验段的成果资料分析,单层支护由于刚度较小,初期支护变形往往过大,侵入二衬净空;双层支护虽能将变形控制到可接受范围,但第一层支护易发生变形速率过大甚至失稳现象,第二层支护需下台阶开挖后方能施作,锚索施工周期较长,无法及时对塑性区进行控制,且需施作二次支护,工序较多<sup>[1-2]</sup>;采用刚度较大的单层支护在配合采用双侧壁导坑工法后能有效的控制支护变形,实现段内工序转换平衡。但不管是单层还是双层支护,施作后支护变形始终不能完全收敛。

若待初期支护完全收敛后再施作二次衬砌,变形长期累计势必会侵入二衬净空,初期支护变形过大可能会导致其失效甚至拆换,为此考虑及时施作二次衬砌,让初期支护和二次衬砌共同作用抵抗围岩压力。

2.2 二衬结构设计

2.2.1 数值分析

对初支和二衬同时作用时的结构受力状态进行分析,采用地层结构方法建立二维实体模型,考虑钢架和锚杆的作用,模拟围岩和支护结构的共同变形。考虑到模型的对称性,此处取一半进行计算,地层结构模型,如图2所示。

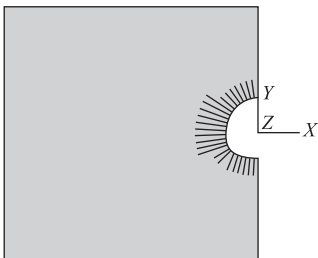


图2 地层结构模型(二维对称模型)

计算中的支护结构的材料物理力学参数,如表4所示。

表4 材料物理力学参数表

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg/m <sup>3</sup> )
H175 型钢	210	0.3	7 850
锚杆(锚索)	210	0.3	7 850
C25 喷射混凝土	23	0.2	2 200
二次衬砌 C35 钢筋混凝土	32.25	0.2	2 500

凝灰岩地层的物理力学参数,如表5所示。

表5 围岩参数表

岩土类型	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /(kg/m <sup>3</sup> )	内摩擦角 /(°)
凝灰岩	1	0.35	2 200	25

原始地应力场参数,如表6所示。

表6 原始地应力场参数表

岩土类型	埋深 /m	围岩重度 $\gamma$ /(kN/m <sup>3</sup> )	垂直压力 $q$ /MPa	水平压力 $e$ /MPa	膨胀力 /MPa
凝灰岩	205	22	4.51	6.13	0.35

2.2.2 计算结果

考虑初期支护和二次衬砌共同承受初期支护变形13 cm后的残余应力,此时二衬施做后边墙单侧收敛约为3 mm,拱顶下沉约为3 mm即达到平衡稳定状态。平衡状态下围岩的应力,如图3所示。

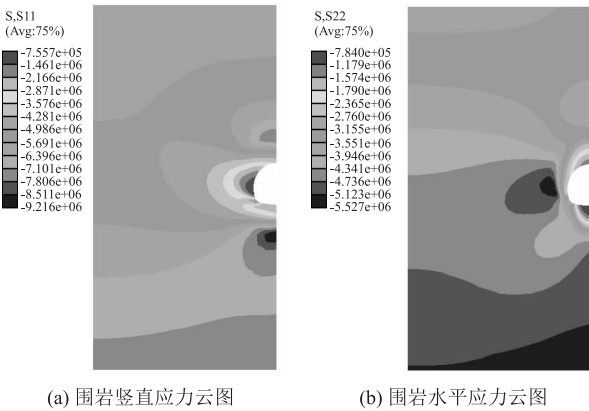


图3 围岩应力云图

根据内力计算结果,二次衬砌仅需构造配筋(4 $\phi 18$ 主筋)即可满足要求。但考虑到极高地应力区域应力释放的不确定性、持久性以及地下水环境变化可能产生的凝灰岩软化、膨胀力等复杂的地质物理化学因素,数值计算难以模拟这些因素,因此,二衬进行加强,采用厚度为55 cm、配筋为5 $\phi 25$ 的二衬结构,其受力和安全性,如表7所示。



表10 初支钢架内外侧测点应力最大值

典型断面	初支钢架内外侧测点应力最大值/MPa					备注
	左拱脚	左拱腰	拱顶	右拱腰	右拱脚	
DIK 306 + 162	-107.52	220.50	-291.69	-136.92	-27.99	内侧
DIK 306 + 172	-59.64	45.78	-292.95	118.23	-69.93	内侧
DIK 306 + 181	47.04	-80.22	-60.27	37.17	-87.78	内侧
DIK 306 + 162	-133.77	-270.48	-334.95	-99.54	-88.41	外侧
DIK 306 + 172	-215.88	-56.07	-307.86	147.63	-40.74	外侧
DIK 306 + 181	-51.66	45.15	49.14	-83.58	-39.48	外侧

表11 衬砌混凝土内外侧测点应力最大值

典型断面	衬砌混凝土内外侧测点应力最大值/MPa					备注
	左拱脚	左拱腰	拱顶	右拱腰	右拱脚	
DIK 306 + 162	-8.47	4.41	-4.95	3.62	-11.03	内侧
DIK 306 + 172	-5.36	1.80	2.33	3.24	-5.86	内侧
DIK 306 + 181	-9.17	-1.98	-9.23	3.37	-8.91	内侧
DIK 306 + 162	4.47	3.84	3.59	-6.36	-8.32	外侧
DIK 306 + 172	3.06	3.18	3.59	-6.14	2.27	外侧
DIK 306 + 181	-2.52	-3.34	2.71	-3.84	1.61	外侧

表12 仰拱衬砌混凝土内外侧最大值

典型断面	衬砌混凝土内外侧测点应力最大值/MPa			备注
	左仰拱	中仰拱	右仰拱	
DIK 306 + 162	-2.61	3.91	2.17	内侧
DIK 306 + 181	3.72	1.83	3.43	内侧
DIK 306 + 162	-1.89	2.14	2.08	外侧
DIK 306 + 181	2.17	-8.60	2.74	外侧

通过各断面测点历时长5年的应力监测得出的时程曲线知,各断面测点测试数据均已稳定,且无异常;该段衬砌混凝土表面无开裂与渗漏水。测点的安全系数数值均满足《铁路隧道设计规范》中“抗拉安全系数大于2.4,抗压安全系数大于2.0”的要求,结构安全性满足要求。

## 4 结论及建议

(1)高地应力软岩段可允许初期支护在可控范围内产生较大的变形,释放一定的应力,但应避免喷射混凝土应力和钢架应力超过其强度设计值而失效。

(2)对于高地应力软岩大变形地段,采用与工程措施匹配的工法能最大程度发挥措施的有效性,如本工点采用的双侧壁导坑法尽早发挥边墙锚索作用,从而抑制支护变形。

(3)通过计算及长期测试成果表明,采用加强型的二次衬砌,与初期支护共同作用来抵抗初期支护变形一定程度后的残余应力是可行的,但是对于二次衬砌结构设计及施作时机应通过数值分析、工程类比后综合确定。

(4)软岩大变形是隧道工程常见的比较棘手的地质问题,工程中应根据实际情况结合理论数值分析后确定支护理念及支护参数,制定科学有效的处理方案。

## 参考文献:

- [1] 卢小亮. 大变形隧道预应力锚索支护技术的应用研究[J]. 江西建材, 2016, 36(5): 228.  
LU Xiaoliang. Research on Application of Prestressed Anchor Cable Support Technology in the Tunnel with Large Deformation [J]. Jiangxi Building Materials, 2016, 36(5): 228.
- [2] 蔡景献, 张继奎, 方俊波. 高地应力千枚岩大变形隧道支护参数试验研究[J]. 隧道建设, 2005, 25(S1): 21-24.  
CAI Jinxian, ZHANG Jikui, FANG Junbo. Experiment Research on Support Parameters for Phyllite Tunnel with Large Deformation Under High Ground Stress [J]. Tunnel Construction, 2005, 25(S1): 21-24.
- [3] 李东, 赵平, 崔建宏. 三联隧道围岩大变形原因分析及处治措施[J]. 路基工程, 2013, 31(6): 182-186.  
LI Dong, ZHAO Ping, CUI Jianhong. Cause Analysis and Treatment Measures for Large Deformation of the Rock Surrounding Sanlian Tunnel[J]. Subgrade Engineering, 2013, 31(6): 182-186.
- [4] 韩静玉. 大断面大变形软岩隧道开挖新方法探索[J]. 中国建设信息, 2011, 17(3): 66-68.  
HAN Jingyu. Exploration of New Excavation Method for Soft Rock Tunnel with Large Section and Large Deformation [J]. China Construction Information, 2011, 17(3): 66-68.
- [5] 罗宁宁, 宋贵明, 李传富, 等. 富水软岩浅埋三线大跨隧道双侧壁导坑法施工技术[J]. 铁道建筑, 2015, 55(12): 43-46.  
LUO Ningning, SONG Guiming, LI Chuanfu, et al. Construction Technology of Double-side Heading Method Shallow-buried Three-line Tunnel with Long Span in Water-rich Soft Rock [J]. Railway Engineering, 2015, 55(12): 43-46.
- [6] 尹福伦. 双侧壁导坑法在大跨度黄土隧道浅埋段的施工技术应用[J]. 内蒙古公路与运输, 2016, 41(1): 29-31.  
YIN Fulun. Application of Double-side Heading Method in Shallow-buried Section of Loess Tunnel with Large Span [J]. Highways & Transportation In Inner Mongolia, 2016, 41(1): 29-31.
- [7] 王兴彬. 不同工法在炭质片岩隧道大变形控制中的应用研究[J]. 隧道建设, 2017, 37(S1): 121-127.  
WANG Xingbin. Study of Application of Different Construction Methods to Tunnel Large-deformation Control in Carbonaceous Slate [J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S1): 121-127.
- [8] 刘高, 张帆宇, 李新召, 等. 木寨岭隧道大变形特征及机理分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S2): 5521-5526.  
LIU Gao, ZHANG Fanyu, LI Xinzhaoh, et al. Research on Large Deformation and Its Application of Muzhailing Tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S2): 5521-5526.

(下转第37页)