

复杂地质条件下隧道三维变形规律分析

张 宇¹, 何 川², 伍晓军¹

(1. 中铁西南科学研究院有限公司, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 对乌鞘岭隧道岭脊 F7 断层和志留系地层的三维位移进行现场测试, 并与三维数值计算结果进行对比分析; 采用均值比较方法分析 F7 断层和板岩地段的三维变形规律, 并与地应力场反演结果进行印证分析。结果表明, F7 断层和千枚岩地段软岩隧道三维位移十分明显, 具有隧道大变形特性, 其纵向位移背离开挖面方向发展并在相距开挖面约 2.0 倍洞径时趋于稳定状态; F7 断层地段隧道三维位移呈不均匀对称地发展变化, 而板岩地段三维位移变化的一致性较好; 隧道三维变形规律与隧道区域地应力场的分布存在相互印证关系。因此, 在复杂地质条件下开展隧道三维位移测试并掌握其三维变形规律, 对隧道工程的修建具有较大的指导作用。

关键词: 隧道; 纵向位移; 三维变形规律; 地应力场反演; 印证关系

中图分类号: U451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)10-1465-07

作者简介: 张 宇(1973-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事隧道及地下工程科研、设计及咨询等工作。E-mail: xnzhyu@126.com。

Analysis of 3D deformation of tunnels under complex geological conditions

ZHANG Yu¹, HE Chuan², WU Xiao-jun¹

(1. Southwest Research Institute of China Railway Engineering Co. Ltd., Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Field tests on 3D displacement at F7 fault and Silurian system strata at the ridge of Wushaoling tunnel were carried out and the test results were analyzed and compared with the 3D numerical results. By comparison of the average values, the 3D deformations at F7 fault and slate section were compared and analyzed, and were verified with the results of back-calculation of ground stress fields. It was shown that the 3D deformation in the tunnel at soft rock was obvious at F7 fault and phyllite section, with the characteristics of large deformation and longitudinal displacement developing in the opposite direction of work face and being stable at a distance about 2.0 times of tunnel diameter from the work face. And the 3D displacement of tunnels at F7 fault zone developed in an uneven symmetrical way, while there was good consistency for 3D deformation at slate section. Furthermore, there was a mutually verifying relationship between 3D deformation and ground stress distribution of tunnel region. Therefore it was necessary to carry out 3D displacement tests to detect the development of its deformation, and it would play a positive role in tunnel construction.

Key words: tunnel; longitudinal displacement; 3D deformation rule; ground stress field inversion; verifying relationship

0 引 言

在隧道及各种地下开挖工程的施工过程中, 所采用的监测项目种类很多, 而各种监测项目中最重要且最常用的为隧道变形的量测。传统的隧道变形量测方式, 主要是对洞室净空各测点间的收敛变形进行量测, 所得到的资料为隧道两测点间的相对变形, 对于承受偏压或受整体边坡滑动影响的隧道, 在很多时候则无法反映其真正的变形情况。近年来, 隧道三维变形测试技术的发展是隧道工程技术进步的一大标志。其中可采用全站仪自由设站净空非接触观测方法量测得到隧道横断面内的水平位移和竖直位移以及隧道轴线方

向上的纵向位移^[1]。

本文主要针对乌鞘岭隧道岭脊复杂地质地段前期施工期间发生明显的隧道大变形现象, 为了从地质、结构与施工方面了解隧道开挖后的三维变形发展规律, 对 F7 断层后期施工期间和志留系地层的隧道三维位移进行测试和分析(重点针对洞室初支结构), 并与相关地应力场反演分析结果进行印证分析, 以进一步对隧道设计参数修正和施工措施调整提供依据。

基金项目: 铁道部科技发展计划项目(2004G043-A)

收稿日期: 2006-07-05

1 乌鞘岭隧道工程地质概况

乌鞘岭隧道位于我国兰新铁路增建兰武二线段打柴沟车站和龙沟车站之间，设计为 2 座单线隧道，线间距 40 m，全长 2×20.05 km。隧道洞身中部通过长约 8 km 的岭脊地段，是一个由主体走向为 NWW 向展布的 F4（隧道通过宽约 450 m，下同）、F5（宽约 145 m）、F6（宽约 75 m）、F7（宽约 785 m）四条区域性的压扭性大断层构成的“挤压构造带”，地应力情况十分复杂（实测地应力最大值达 33 MPa，以水平地应力为主），岩性复杂、岩质软弱，以泥砾岩为主，围岩破碎、挤压现象明显，次生结构面发育、呈垂直状，有扭曲现象；无明显地下水出露；围岩级别均为 V 级。如图 1 所示乌鞘岭隧道工程地质纵断面分布^[2]。

隧道施工过程中表现最突出的工程地质问题，是 F4~F7 断层“挤压构造带”区域在深埋高地应力条件下的软弱围岩大变形地质灾害，尤其以 F7 活动断层

挤压带及志留系千枚岩地段的变形更为突出。

2 乌鞘岭隧道三维变形测试及结果

在乌鞘岭隧道岭脊地段 F7 断层后期施工期间和志留系地层板岩地段（以板岩为主和板岩—千枚岩过渡段）、千枚岩地段（以千枚岩为主）施工期间，开展了隧道三维变形现场测试工作。测试断面布置如图 2 所示，断面测点布置如图 3 所示。由于该隧道的工期十分紧迫，F7 断层地段和志留系千枚岩地段围岩变形大，为尽可能减小围岩大变形造成支护结构发生较严重的破坏，隧道施工采用约 7.5 m 长的上下短台阶法并预留核心土进行开挖后便立即实施强支护（初期支护）措施，同时紧跟二次衬砌，因此二衬施作前铺设防水层时距离前方开挖面在 20~30 m 范围，隧道三维变形测试断面所经历的量测时间很短，大多在一两个星期内。三维位移测试结果分别见表 1，2^[3]。

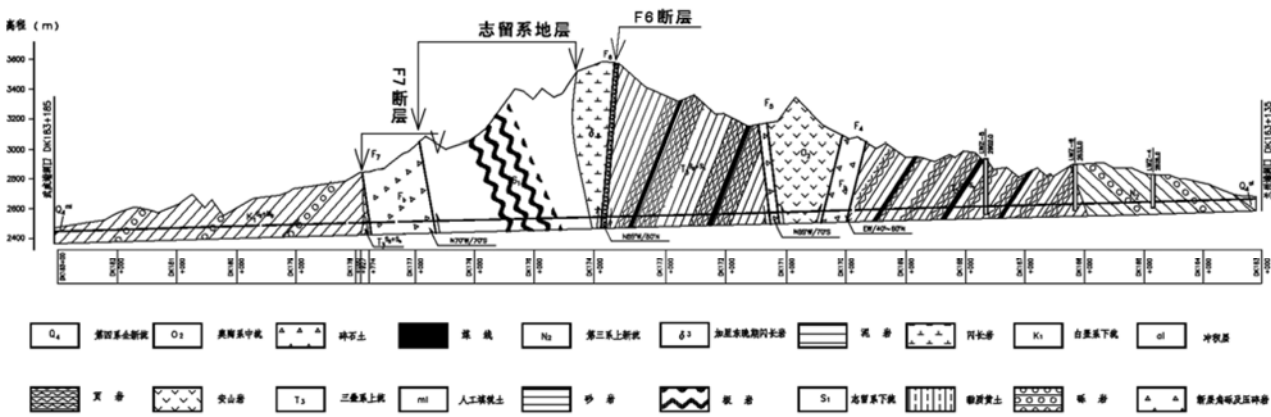


图 1 乌鞘岭隧道工程地质纵断面示意图
Fig. 1 Geological profile of Wushaoling tunnel

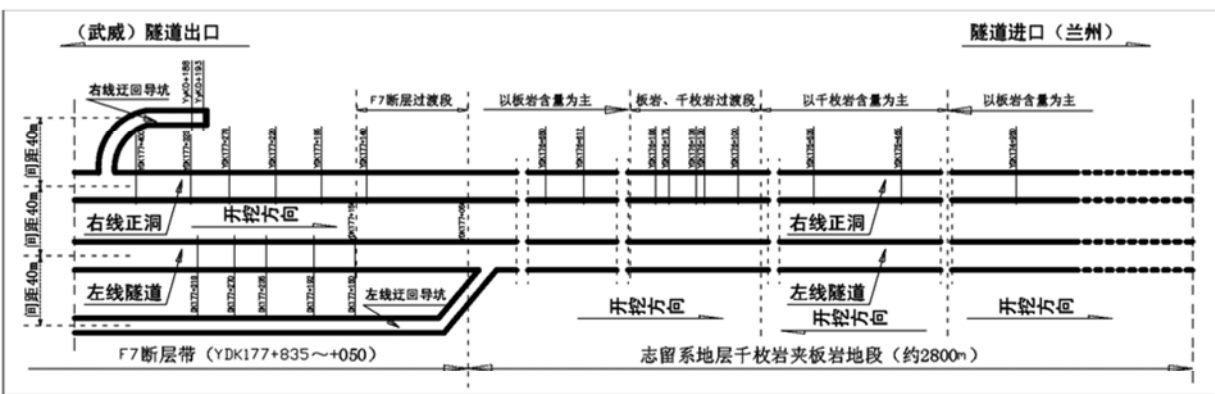


图 2 F7 断层和志留系地层三维变形测试断面布置
Fig. 2 Layout of 3D deformation tests at F7 fault and Silurian system strata

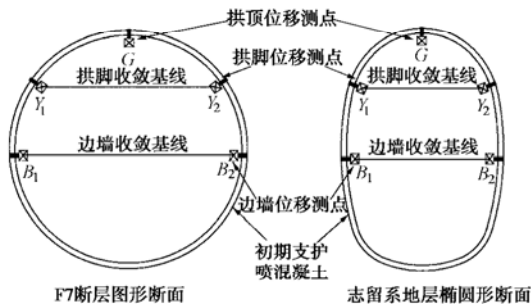


图 3 F7 断层、志留系地层三维变形断面测点布设

Fig. 3 Test points of 3D deformation tests at F7 fault and Silurian system strata

通过对乌鞘岭隧道分别穿越 F7 断层和志留系千枚岩两种不同地质地段时, 由开挖引起隧道初期支护结构发生的三维位移与开挖面的发展关系进行数值模拟计算, 其结果见表 3, 其中纵向位移(均背离开挖面发展)与开挖面关系曲线如图 4 所示^[4]。

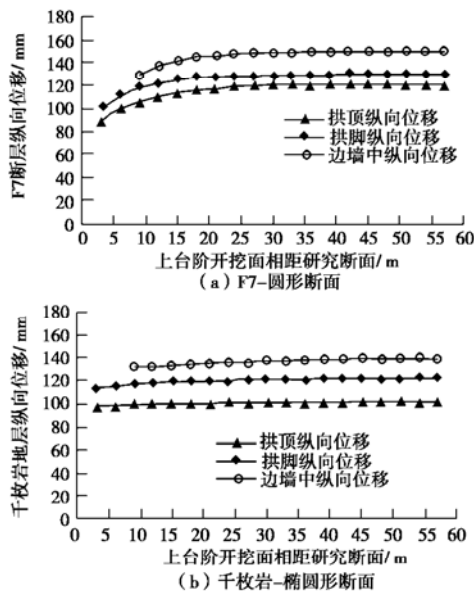


图 4 纵向水平位移 - 开挖面关系曲线

Fig. 4 Longitudinal displacement-distance to work face curves

以表 1~3 中的实测位移与计算结果进行比较可知, 纵向位移的实测值约比计算值小 1 个量级, 反映出隧道的纵向位移主要发生在开挖后的瞬间, 在量测初期没有及时测到或用量测手段一般难以及时捕捉到这部分变形。尽管隧道的竖直位移和横向位移产生的变形在开挖后的瞬间也有明显的释放, 但后续测试表明, 两种软岩隧道在横断面内发生变形的时间效应更明显, 到量测截止时隧道横向水平位移和竖直位移仍处于发展状态。隧道纵向位移大致在相距开挖面 2.0 倍洞径(F7 断层约 12.0 m)时已趋于稳定状态, 如计算曲线图 4 和实测曲线图 5 所示(限于篇幅, 此处略去了横断面内的位移曲线)。

表 1 F7 断层和志留系地层三维位移实测最大值

Table 1 Measured max. values of 3D deformation at F7 fault and Silurian system strata

位移	mm			
	F7 断层 - 圆形断面		志留系(右线正洞) - 椭圆形断面	
	右线正洞	左线平导	板岩地段	千枚岩地段
竖直	350	160	45	300
横向	150	100	50	200
纵向	90	70	15	100
历时	10 d 左右		20 d 左右	10 d 左右

表 2 F7 断层和千枚岩地段三维位移量测均值

Table 2 Average measured values of 3D deformation at F7 fault and phyllite section

位移	F7 断层			千枚岩地段		
	拱顶	拱脚	边墙中	拱顶	拱脚	边墙中
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
竖直	109.7	139.8	49.7	56.6	123.2	9.1
横向	9.6	60.2	50.2	4.6	112.6	51.7
纵向	20.5	34.6	10.1	30.6	31.3	22.4
历时	7 d	8 d	5 d	7 d	8 d	7 d

表 3 F7 断层和千枚岩地段三维位移计算结果

Table 3 Computed results of 3D displacement at F7 fault and phyllite section

位移	F7 断层-圆形断面			千枚岩地段-椭圆形断面		
	拱顶	拱脚	边墙中	拱顶	拱脚	边墙中
	mm	mm	mm	mm	mm	mm
竖直	177.5	80.8	-53.4	158.2	82.5	-70.8
横向		127.7	194.2		116.2	225.3
纵向	120.5	130.7	150.1	102.2	122.4	139.4

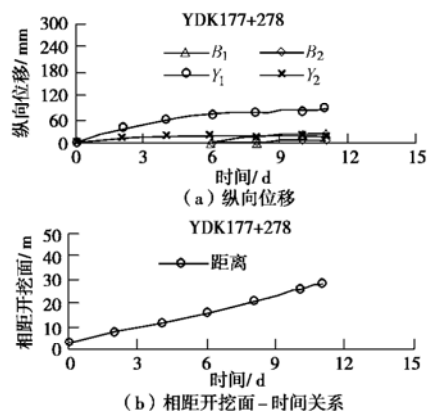


图 5 F7 断层地段纵向位移/相距开挖面 - 时间关系曲线

Fig. 5 Longitudinal displacement/ distance to work face-time curves at F7 fault

从表 2, 3 还可知, 乌鞘岭隧道 F7 断层和志留系千枚岩地段的三维位移计算值和量测值在各研究部位的位移大小及其关系上存在一些差别, 这主要由 F7 断层地段圆形隧道和千枚岩地段的椭圆形隧道分别所处围岩地质条件存在一定的差异以及两种隧道的断面参数不一致而引起的。但两种隧道在处于特殊工程地质环境中的三维变形均十分明显, 具有隧道大变形特性; 其中各研究部位的纵向位移均背离开挖面方向发展, 这是在软岩地层中隧道开挖后的纵向位移变化发展所具有的一大特征。

3 乌鞘岭隧道三维变形规律分析

采用均值比较方法,对隧道岭脊地段 F7 断层和板岩地段三维位移数据进行分析,表 4~6 分别列出了 F7 断层隧道两侧纵向位移、横向水平位移和竖直位移的分布情况,图 6 为 F7 断层和板岩地段的纵向位移分布^[3-4]。

表 4 F7 断层各洞室两侧纵向位移

Table 4 Longitudinal displacement on both sides of excavations at F7 fault

隧道	里程	纵向位移/mm						左侧均值 右侧均值	平均 倍数
		左边墙	左拱脚	左侧平均	右拱脚	右边墙	右侧平均		
迁导	+188	23.70	30.70	27.20	21.80	14.70	18.25	1.20	1.18
	+193	15.00	31.10	23.05	29.70	3.00	16.35	1.17	
	+140	11.04	19.35	15.20	3.76	2.69	3.23	4.71	
右线正洞	+185	5.60	38.20	21.90	27.60	-3.40	12.10	1.81	3.62
	+220	21.80	33.90	27.85	17.50	2.70	10.10	2.76	
	+278	14.50	86.40	50.45	11.10	2.30	6.70	7.53	
	+323		28.50	28.50	27.90		27.90	1.02	
	+400	101.30	106.50	103.90	48.60	4.80	26.70	3.89	
左线平导	+270	9.50	34.50	22.00	6.20	8.70	7.45	2.95	2.70
	+235	25.43	61.05	43.24	21.83	7.82	14.83	2.92	
	+192	18.26	49.13	33.70	24.46	0.52	12.49	2.70	
	+150	15.14	70.22	42.68	33.84	4.41	19.13	2.23	

表 5 F7 断层各洞室两侧横向水平位移

Table 5 Horizontal displacement on both sides of excavations at F7 fault

隧道	里程	横向水平位移/mm				左边墙 右边墙	左拱脚 右拱脚	左右倍 数均值	平均 倍数
		左边墙	右边墙	左拱脚	右拱脚				
迁导	+188	113.00	53.10	116.40	17.10	2.13	6.81	4.47	3.49
	+193	149.70	54.10	112.30	49.80	2.77	2.26	2.51	
	+278	74.30	54.00	147.10	77.20	1.38	1.91	1.64	
右线正洞	+220	32.70	18.50	25.60	25.60	1.77	1.00	1.38	1.25
	+185	20.50	26.10	42.50	50.50	0.79	0.84	0.81	
	+140	38.20	30.40	36.20	33.30	1.26	1.09	1.17	
	+270	39.90	16.80	21.30	75.40	2.38	0.28	1.33	
左线平导	+235	57.40	73.50	43.00	52.30	0.78	0.82	0.80	1.03
	+192	51.60	52.80	58.50	46.80	0.98	1.25	1.11	
	+150	31.60	44.60	82.80	77.30	0.71	1.07	0.89	

从表 4 可以看出, F7 断层地段右线迁回导坑、右线正洞、左线平导 3 条隧道位于断面左侧(由平导指向正洞侧)的纵向位移分别大于断面右侧的纵向位移:左侧边墙和拱脚两部位的纵向位移平均值分别比右侧边墙和拱脚两部位的纵向位移平均值大,分别为 3.62 倍、2.70 倍、1.18 倍。从表 5, 6 可以看出, F7 断层地段各洞室横向水平位移和竖直位移在断面左右两侧的变化也不一致,其中右线正洞和左线平导位于左侧的横向、竖直位移分别比右侧的大一些。分析认为,

这除与 F7 断层 4 个相邻洞室的断面参数和施工开挖工序引起的围岩应力释放时间和释放程度有一定关系外,还与 F7 断层所处隧道区域地应力场的分布特点有较大关系。

从图 6 可知,在两个测试地段量测时段基本一致的情况下, F7 断层隧道的纵向位移(含拱顶纵向位移)明显比板岩地段的纵向位移大一些。从表 1 还可知, F7 断层隧道的横向、竖直位移也分别比板岩地段的横向、竖直位移大一些。但板岩地段的纵向位移和横向、竖直位移,在左右两侧的变化相差不大,其量值基本相当:左侧纵向位移和横向、竖直位移分别是右侧的 1.01 倍、1.06 倍、1.02 倍。

表 6 F7 断层各洞室竖直位移

Table 6 Vertical displacement of excavations at F7 fault

隧道	里程	竖直位移/mm						左边墙 右拱脚	左拱脚 右拱脚	左右倍 数均值	平均 倍数
		左边墙	右边墙	拱顶	左拱脚	右拱脚	右边墙				
迁导	+188	7.7	37.3	53.3	82.7	77.1	0.21	1.07	0.64	0.69	
	+193	17.2	23.6	11.6	40.7	53.8	0.73	0.76	0.74		
右线正洞	+278	79.8	72.4		342.2	348.4	1.10	0.98	1.04	1.24	
	+220	74.8	51.2	57.8	134.6	110.9	1.46	1.21	1.34		
	+185	28.3	26.3	131.5	70.2	72.0	1.08	0.98	1.03		
	+140	31.8	15.4	74.9	66.8	64.2	2.06	1.04	1.55		
	+270	39.8	50.2	130.0	109.6	115.0	0.79	0.95	0.87		
左线平导	+235	51.5	87.1	76.5	66.7	58.6	0.59	1.14	0.86	1.56	
	+192	50.4	41.9	101.8	102.3	85.3	1.20	1.20	1.20		
	+150	58.5	12.1	136.1	157.4	90.2	4.83	1.75	3.29		

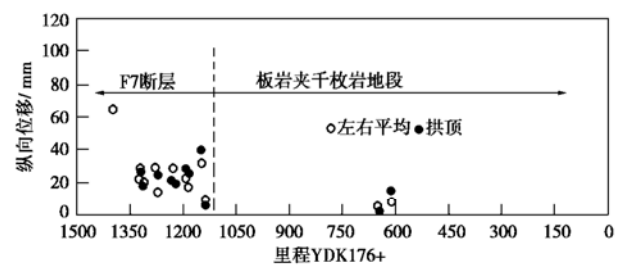


图 6 F7 断层、板岩地段纵向位移分布

Fig. 6 Distribution of longitudinal displacement at F7 fault and slate section

4 隧道三维位移与地应力场的相互印证

通过上述分析,已认识到乌鞘岭隧道各测试地段三维位移的发展规律和分布特征,表 7 列出了隧道 F7 断层、志留系板岩地段各洞室的三维位移在断面左右两侧的分布特征,用“特征值”来表示如表 4~6 中的“平均倍数”。可以反映出, F7 断层地段的三维位移变化受各种因素的影响作用较大,支护结构的变形及受力较为复杂。

表 7 F7 断层、板岩地段三维位移分布特征值

Table 7 Characteristics of distribution of 3D displacement at F7 fault and slate section

隧道	F7 断层地段			志留系地层 板岩地段
	右线迁导	右线正洞	左线平导	
纵向位移	1.18	3.62	2.70	1.01
横向位移	3.49	1.25	1.03	1.06
竖直位移	0.69	1.24	1.56	1.02

为了更好地满足工程设计和施工的需要, 相关研究在实测地应力结果的基础上, 结合现场地质构造条件, 采用有限元多元回归分析方法, 对地应力场的形态和特点进行了反演分析^[5]。其结果表明乌鞘岭隧道 F4~F7 断层区段应力状态比较复杂, 属于复杂高地应力区段。隧道宏观地应力场的主应力方向约 N22° E, 与隧道轴线(方向为 N17° W)的夹角约为 39°, 断层区隧道衬砌具有纵向挤压的特点。图 7 为乌鞘岭隧道主应力方向和隧道轴向与 F7 断层走向关系示意图^[4], 图 8 为乌鞘岭隧道 F7 断层特征及与隧道位置关系示意图^[6]; 图 9 为乌鞘岭隧道地应力场反演分析模型隧道轴线剖面图, 其中 F6 断层、志留系地层及 F7 断层位于 II+III 组合模型中^[5]。

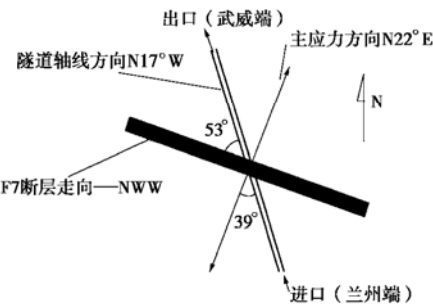


图 7 隧道主应力方向、轴向与 F7 断层走向关系示意图
Fig. 7 Relationship among principal stress direction, axial direction of tunnel and direction of F7 fault strike

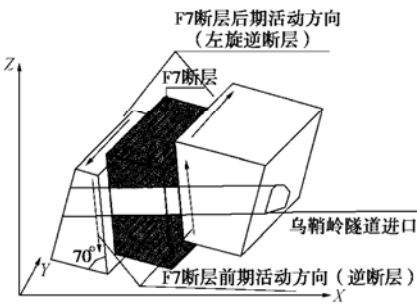


图 8 F7 断层特征及与隧道位置关系示意图
Fig. 8 Relationship between characteristics of F7 fault and tunnel position

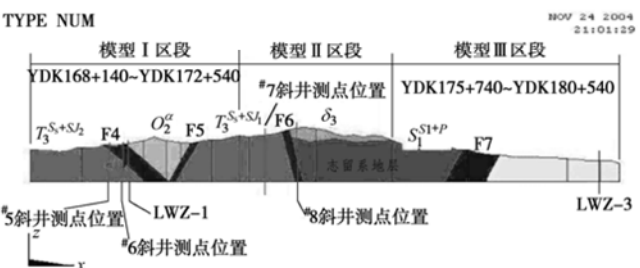


图 9 地应力场反演分析模型(隧道轴线剖面)

Fig. 9 Model of ground stress field (longitudinal section of tunnel)

图 10, 11 分别为模型 II+III 在隧道轴线纵剖面的 σ_x , σ_y 及 σ_z 随里程的变化曲线, 以及竖向应力 σ_v 、最大水平主应力 σ_H 和最小水平主应力 σ_h 随里程的变化曲线, 均反映出 F6、F7 断层以及中间的志留系板岩地段地应力较高及其分布特点。

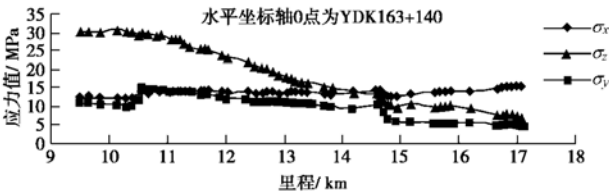


图 10 II+III 组合模型轴线纵剖面三个方向的应力曲线
Fig. 10 Stress curve of longitudinal section for II+III composite model

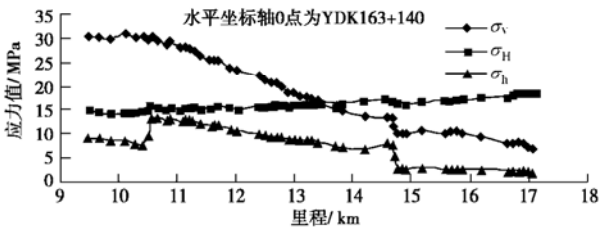


图 11 II+III 组合模型轴线纵剖面主应力曲线
Fig. 11 Principal stress curve of longitudinal section for II+III composite model

为宏观评估受断层带影响的隧道衬砌横向受力特点, 还分别给出了模型 II+III 在 F6~F7 断层间剖面中心与隧道轴线的交点位置 YDK176+140 处(位于板岩地段)、YDK177+640 处(位于 F7 断层核心)横剖面上的 σ_x , σ_y 以及 σ_z 应力云图, 分别如图 12, 13 所示。可以看出, 隧道在从兰州到武威方向进入志留系板岩地段时横向受力基本对称, 隧道在进入 F7 断层地段时表现出横向受力不够对称, 在一定范围内有明显的偏载现象。

上述分析, 反映出隧道进入 F7 断层地段时, 由于应力状态复杂各相邻洞室先后开挖后支护结构的受力不对称, 其三维位移变化不一致, 尤其是纵向位移的变化发展——左侧的纵向位移较明显地大于右侧的纵向位移; 隧道进入志留系板岩地段时, 洞室支护结

构受力相对匀称,其三维位移变化的一致性相对较好。

5 后期施工设计修正与措施调整

在乌鞘岭隧道 F7 断层后期施工期间,为有效地控制隧道大变形或尽可能减小隧道大变形的发生,同时针对洞室开挖后隧道呈现出在复杂应力条件下的受力状况十分复杂、支护结构左右两侧的变形分别在横向和纵向上明显不一致的特征,现场及时对设计参数进行了修正并对施工措施进行了调整:加强初期支护和二次衬砌的承载能力,如缩小超前支护小导管环向间距,增加导管数量,初期支护的型钢由原来的 I16 增强为 I20,缩小型钢的环向间距由原来的 3 榀/2 m 改为 2 榀/1 m,加强初支钢架间纵向连接筋强度,二次衬砌钢筋混凝土由原来的 50 cm 增厚到 80 cm,主筋的纵向间距由原来的 20 cm 缩小到 12.5 cm,这样在施筑衬砌时不但注重了结构横向上的受力特性,而且还充分考虑到了结构纵向上的受力特性,以防止结构在纵向上发生扭曲等破坏现象;开挖施工方法由原来的长台阶法改为短台阶法并预留核心土,对台阶的长度进行严格控制,上台阶的长度约 7.5 m,下台阶长度不超过 15.0 m,二次衬砌施工相距下台阶开挖面不超过 50 m。因此,在 F7 断层地段后期施工期间隧道的位移变形明显减小,没有或无明显地发生如施工前期初期支护结构不仅在横向上有较大的内挤变形,而且有明显的纵向扭曲变形,初支钢架局部错裂剪断、失稳坍塌,二次衬砌大面积开裂、局部纵向扭曲破裂等严重的变形破坏现象^[4]。

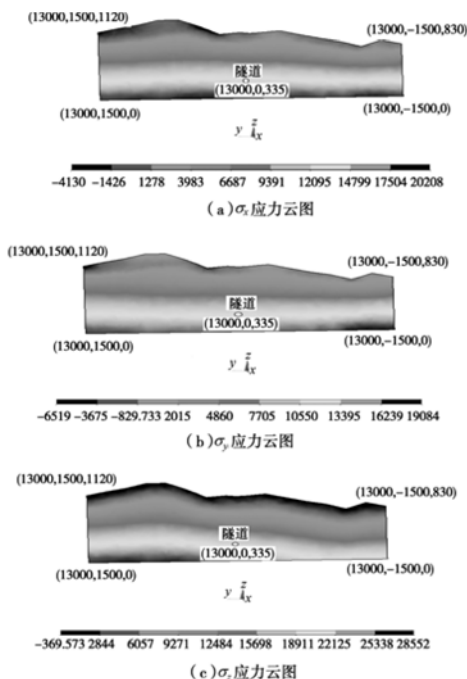


图 12 板岩地段隧道 (YDK176+140 处) 横剖面应力云图
Fig. 12 Stress nephogram of transverse section (YDK176+140) of tunnel at slate section

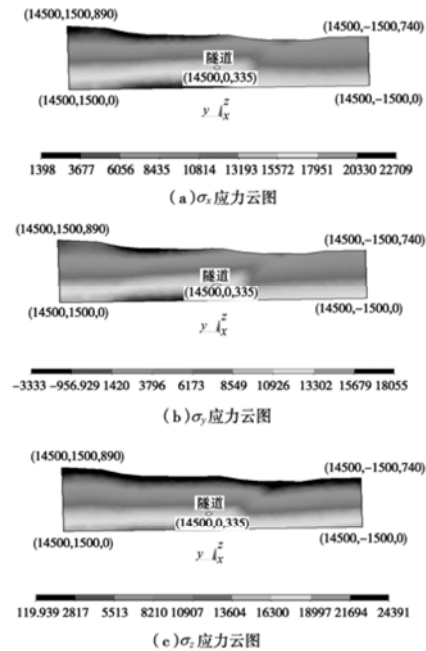


图 13 F7 断层地段隧道 (YDK177+640 处) 横剖面应力云图
Fig. 13 Stress nephogram of transverse section (YDK177+640) of tunnel at F7 fault section

6 结 语

(1) 乌鞘岭隧道岭脊地段由 F4~F7 四条区域性大断层构成“挤压构造带”。通过现场实测和数值分析表明, F7 断层和志留系千枚岩地段开挖引起的隧道三维位移十分明显, 具有软岩隧道大变形特性。软岩隧道纵向位移具有背离开挖面方向发展的特征, 并主要发生在开挖后的瞬间, 其变化发展大致在相距开挖面 2.0 倍洞径时便趋于稳定状态; 隧道横向水平位移和竖直位移具有明显的时间效应。

(2) 隧道三维变形发展规律与隧道区域地应力场的分布存在相互印证关系。乌鞘岭隧道 F7 断层地段的三维位移变化十分复杂, 各位移分量呈现出不均匀对称的发展状态, 与 F7 断层所处 4 个相邻洞室的断面参数及施工开挖工序有一定关系。地应力场反演分析表明, 宏观地应力场的主应力方向与隧道轴线存在明显的夹角, F7 断层区隧道衬砌具有纵向挤压特点, 横向上有明显的偏载现象。而隧道进入志留系板岩地段时, 洞室支护结构受力相对匀称, 其三维位移变化的一致性相对较好。

(3) 在复杂地质条件下的隧道施工中, 开展隧道三维位移测试并掌握其三维变形发展规律, 有利于辅助分析隧道区域地应力场的分布特点, 并对隧道设计参数修正和施工措施调整等工作具有指导作用。在 F7 断层地段后期施工期间的隧道变形得到了有效的控制, 其变形控制措施值得借鉴。

(4) 乌鞘岭隧道岭脊地段复杂地应力条件下的三维变形规律研究, 主要在施工期间对洞室初支结构的位移变形进行了现场测试和分析, 今后类似工程中还应应对施工后期二衬结构的位移变形进行深入的测试分析和研究, 以便对隧道结构长期安全的使用和维护提供更丰富的依据。

参考文献:

- [1] 宋 冶. 用全站仪进行隧道净空三维变形非接触观测[C]// 第三届全国青年岩石力学与工程学术研讨会论文集. 成都: 西南交通大学出版社, 1995: 400 - 404. (SONG Ye. 3D deformation non-contact observation of tunnel clearance with total station[C]// Transactions of the 3rd National Youth Rock Mechanics and Engineering Symposium. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995: 400 - 404. (in Chinese))
- [2] 卿三惠, 黄润秋. 乌鞘岭特长隧道软弱围岩大变形特性研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(2): 7 - 14. (QING San-hui, HUANG Run-qiu. Study on large deformation characteristics of Wushaoling extra-long tunnel at soft rock[J]. Modern Tunneling Technology, 2005, 42(2): 7 - 14. (in Chinese))
- [3] 中铁西南科学研究院. 乌鞘岭隧道岭脊地段洞室三维变形(位移)规律研究阶段成果报告[R]. 2005. (Southwest Research Institute of China Railway Engineering. Stage report of "Study on 3D deformation (displacement) rule of tunnel excavation at the ridge section of Wushaoling tunnel[R]. 2005. (in Chinese))
- [4] 张 宇. 隧道三维变形规律研究及其在乌鞘岭隧道工程中的应用[D]. 2006. (ZHANG Yu. Study on 3D deformation rule of tunnel and its application to Wushaoling tunnel[D]. 2006. (in Chinese))
- [5] 兰州交通大学. 乌鞘岭隧道岭脊地段地应力的形态和特点研究阶段成果报告[R]. 2004. (Lanzhou Jiaotong University, Stage report of "Study on ground stress formation and characteristics at the ridge section of Wushaoling tunnel[R]. 2004. (in Chinese))
- [6] 苟 彪, 项志敏, 张松柏. F7 断层挤压性围岩大变形控制技术[J]. 铁道标准设计, 2005(9): 37 - 40. (GOU Biao, XIANG Zhi-min, ZHANG Song-bai. Large deformation controlling technology for extruded surrounding rock at F7 fault[J]. Railway Standard Design, 2005(9): 37 - 40. (in Chinese))