

炭质页岩隧道变形特征研究与稳定性分析

陈登玉

(中铁十四局集团 第四工程有限公司, 山东 济南 250002)

摘要: 大丽铁路松桂 1 号隧道在施工过程中围岩变形较大, 出现了喷射混凝土开裂、净空侵限、钢架变形等施工难题, 造成施工进度极其缓慢的现状。通过试验对炭质页岩的膨胀性、崩解性、风化性等物理特性进行研究, 并分析层理产状对隧道稳定性的影响, 指出垂直节理最不利于隧道的稳定。在隧道施工过程中对围岩变形进行现场测试, 根据现场监测结果得出炭质页岩隧道的最大累计变形量和变形速度都发生在边墙位置, 水平地应力为最大主应力。

关键词: 炭质页岩; 隧道; 围岩变形; 稳定性

中图分类号: U455.49

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2011)02-0058-07

Research on Deformation Features and Stability Analysis of Tunnels in Carbonaceous Shale

CHEN Dengyu

(The 4th Engineering Co. Ltd., China Railway 14th Bureau Group Co. Ltd., Jinan, Shandong 250002, China)

Abstract: In construction process of Songgui No. 1 tunnel, Dali railway, the deformation of surrounding rock was quite big, which caused many construction difficulties, such as the cracking of shotcrete, the over-break of clean cross-section and the deformation of steel frames, etc., leading to the very slow progress of construction. Through the study of physical properties of carbonaceous shale, such as dilatibility, disintegration and weathering, etc. by experiment and the influence of bedding occurrence on the tunnel stability, it showed that the vertical joints were most harmful to the stability of tunnels. In tunnel construction process the field test of the surrounding rock deformation was carried out, and according to the above results the deformation law is that the maximum accumulative total deformation and maximum deformation velocity all occurred in sidewalls and the horizontal ground stress is the maximum principal stress.

Key words: carbonaceous shale; tunnel; deformation of surrounding rock; stability

随着我国铁路交通网络的快速发展, 隧道工程也得到了快速的发展。我国幅员辽阔, 地质构造复杂, 地层岩性种类繁多, 随着隧道修建的越来越长, 隧道修建的难度也逐渐加大。炭质页岩在我国滇西地区分布较广, 在炭质页岩中修筑隧道时围岩变形较大, 容易引起喷射混凝土开裂、净空侵限、钢架变形等工程难题, 造成施工进度极其缓慢, 延误工期。国内外许多专家通过建立力学模型对岩石的应变软化进行研究, 其中: 日本学者川本眺万^[1]提出了线性应变软化模型; Dems 和 Mroz^[2]提出了应变软化的理想弹脆塑性模型研究岩石的应变软化过程; 解廷堃等^[3]在前人的基础上, 通过炭质页岩常规三轴试验和本构方程研究炭质页岩隧道大变形的原因。本文以大丽铁路松桂 1 号隧道的施工为工程背景, 通过对炭质页岩变形特征的试验研究和隧道围岩收敛情况的监测, 总结炭质页岩的变形特征, 并对隧道的稳定性进行评价。

1 工程概况

松桂 1 号隧道位于大丽线花兰箐至金墩之间, 隧道进口里程为 DIK108+463, 出口里程为 DK110+

收稿日期: 2011-01-10

基金项目: 中铁十四局集团科技开发基金项目(ZT14J-4-02)。

作者简介: 陈登玉(1964—), 男, 山东莒南人, 高级工程师, 从事工程技术研究和管理工作。E-mail: cdy1964@chinaren.com.

958,全长 2 495 m,设计时速 120 km/h,为预留电化条件的单线铁路隧道。隧道穿越剥蚀中山地貌,山峦起伏,地势陡峻,地面高程 2 230~2 430 m,最大埋深 120 m,自然横坡 20°~40°,地表植被发育,基岩零星出露。隧道洞身纵断面见图 1。隧道穿越的主要地层为炭质页岩,在施工过程中,隧道支护结构多次发生变形侵限^[4],最大变形达 90 cm,给施工带来极大困难。

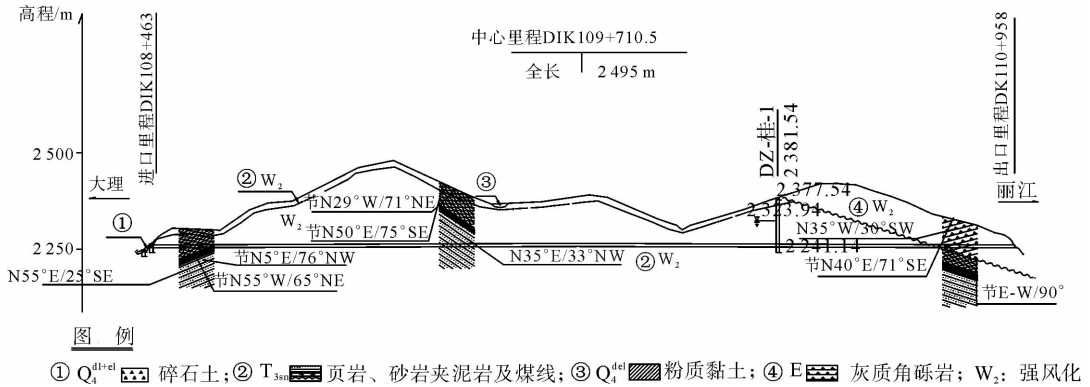


图 1 松桂 1 号隧道洞身纵断面图

Fig. 1 The vertical section of Songgui No. 1 tunnel, Dali railway

2 炭质页岩变形特征

由高密度电阻率成像探测法超前探测得知,炭质页岩主要由固结较弱的粘土在地壳运动中经过挤压、脱水、重结晶和胶结作用形成。它属于沉积岩,由粘土矿物及有机质组成,泥质结构,粒径 <0.005 mm,节理发育,薄层状构造,岩质脆,岩性软弱,易风化破碎,强度低,与水作用易于软化崩解而丧失稳定性^[5]。下面将通过试验来具体研究炭质页岩的变性特征。

2.1 炭质页岩膨胀性

炭质页岩的膨胀性以其自由膨胀率的大小来反映,其主要影响因素有含水量、环境湿度(初始含水量)、含水率、岩石的结构、岩石的干密度及孔隙率。通过现场取样,对松桂 1 号隧道炭质页岩膨胀性进行试验,可知本次岩样的自由膨胀率在 19%~22%之间,属于弱膨胀岩。具体试验结果见表 1。

2.2 炭质页岩崩解性

炭质页岩的成分以粘土矿物为主,同时岩体内大多均含先存裂隙及微裂缝。在炭质页岩中,由于伊利石、高岭石等粘土矿物颗粒较小,亲水性很强,当水灌入岩石的孔隙、裂隙时,细小岩粒的吸附水膜便会增厚,引起岩石体积的膨胀,而不均匀的体积膨胀在岩石内部就产生不均匀应力,部分胶结物会被稀释、软化或溶解,从而导致岩石颗粒的碎裂解体,从而形成崩解。

表 1 炭质页岩自由膨胀率试验结果表

Tab. 1 The test results of free expansion ratio of carbonaceous shale

岩样编号	干土质量/g	量筒编号	不同时间的读数/mL						自由膨胀率 δ_{ef}
			2 h	4 h	6 h	8 h	10 h	24 h	
1	12.5	1	12.0	12.1	12.1	12.2	12.2	12.2	22
	12.6	2	11.9	12.0	12.1	12.1	12.1	12.2	
2	12.4	1	11.8	11.8	11.9	11.9	12.0	12.1	19
	12.4	2	11.0	11.3	11.5	11.6	11.7	11.7	
3	12.4	1	11.8	11.8	11.9	12.0	12.1	12.1	20
	12.5	2	11.7	11.7	11.9	11.9	11.9	11.9	
4	12.5	1	12.3	12.3	12.4	12.4	12.4	12.4	21
	12.5	2	11.7	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	
5	12.6	1	12.1	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	21.5
	12.5	2	11.9	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	
6	12.6	1	11.7	11.8	11.9	11.9	11.9	11.9	22
	12.5	2	12.0	12.3	12.4	12.5	12.5	12.5	
7	12.6	1	11.8	11.9	11.9	12.0	12.0	12.0	21.5
	12.6	2	12.2	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	

注:1~4 号岩样为标准试验,5~7 号岩样为经过 0.05 mm 筛子筛选后的自由膨胀率试验。

经研究表明:在岩体的原状结构(包括其天然含水量)未受破坏时,将其置入水中,只会产生岩样表面的泥化,而并不会发生大面积的崩解;但当岩样的原始结构遭破坏或被扰动时,遇水后,立即就有崩解现象发生。图 2 为松桂 1 号隧道掌子面岩体的崩解;图 3 为隧道内岩块的崩解。

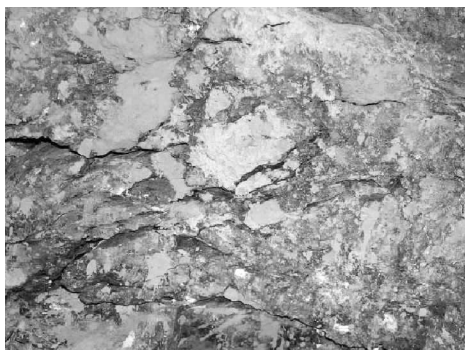


图 2 掌子面岩体的崩解图

Fig. 2 Rock disintegration in heading face of tunnel



图 3 隧道内岩块的崩解图

Fig. 3 The disintegration of the rock inside the tunnel

2.3 炭质页岩层理结构与隧道稳定性分析

炭质页岩在形成的过程中,在垂直层理方向受力的挤压作用下多发生弯曲的褶皱现象,形成层状的挤密体,如图 4 所示。在炭质页岩中开挖隧道后,一方面开挖轮廓周边高挤密性的炭质页岩层理体具有恢复其原状的临空面,另一方面炭质页岩暴露于空气中崩解膨胀,从而释放出很大的地应力作用于支护结构,容易造成支护结构的开裂和大变形,如图 5 所示。为具体研究不同层理方向的炭质页岩对隧道稳定性的影响,在松桂 1 号隧道开挖后,选择三个典型层理方向的炭质页岩地段,在初期支护结构和隧道岩面之间埋设位移传感器和压力传感器进行实时监测,具体分析如下。

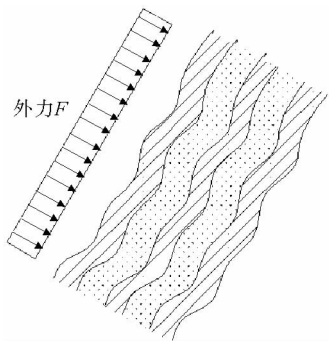


图 4 炭质页岩层理及褶皱的形成图

Fig. 4 The formation of bedding and fold in carbonaceous shale

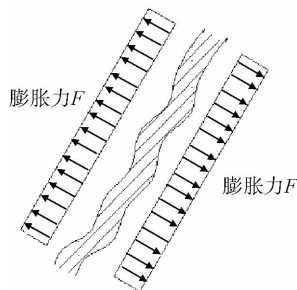


图 5 深埋炭质页岩层理体应力释放图

Fig. 5 The bedding body stress release in deep buried carbonaceous shale

2.3.1 水平层理与隧道的稳定性

隧道开挖后,炭质页岩沿着垂直层理方向膨胀,进行应力释放,层理结构对隧道拱部的稳定性不利,而边墙部位稳定,如图 6 所示。

2.3.2 垂直层理与隧道的稳定性

隧道开挖后,炭质页岩沿着垂直层理方向膨胀,层理结构对隧道边墙的稳定性不利,而拱部相对稳定,如图 7 所示。

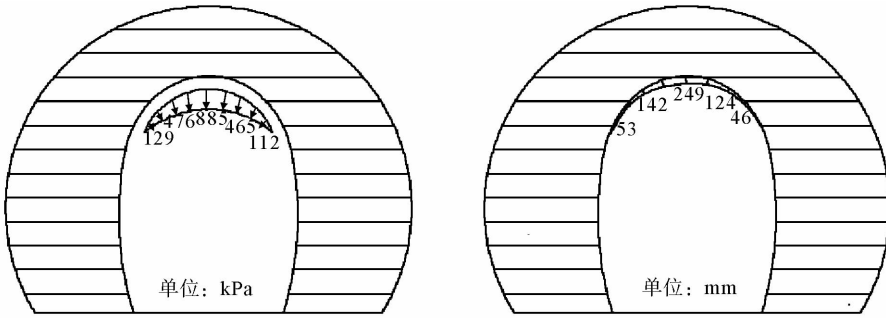


图 6 水平层理条件下隧道初期支护的应力状态及 28 d 后隧道变形情况图

Fig. 6 The stress state of preliminary supports and the deformation of tunnel after 28 days under horizontal bedding conditions

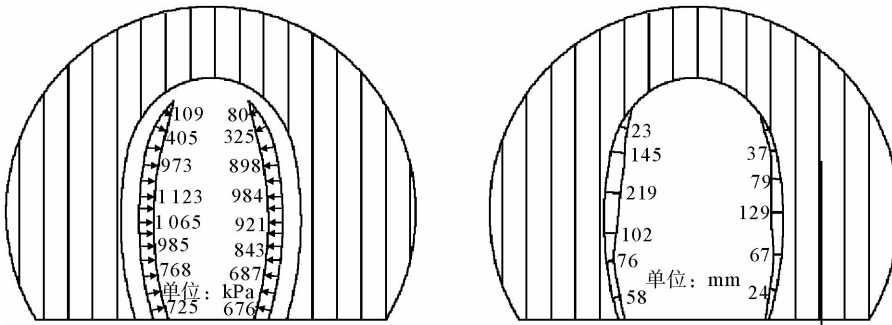


图 7 垂直层理条件下隧道初期支护的应力状态及 28 d 后隧道变形情况图

Fig. 7 The stress state of preliminary supports and the deformation of tunnel after 28 days under vertical bedding conditions

2.3.3 倾斜层理与隧道的稳定性

隧道开挖后,炭质页岩沿着倾斜层理方向膨胀,层理结构对左侧拱腰的稳定性影响较大,而边墙及拱部相对稳定,如图 8 所示。

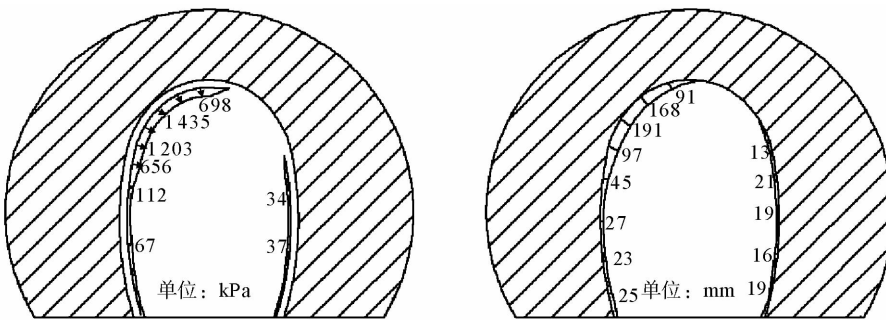


图 8 倾斜层理条件下隧道初期支护的应力状态及 28 d 后隧道变形情况图

Fig. 8 The stress state of preliminary supports and the deformation of tunnel after 28 days under bias bedding conditions

3 隧道围岩变形稳定性分析

3.1 隧道围岩变形监测内容及方法

为掌握松桂 1 号隧道炭质页岩地段的围岩变形情况,在现场对隧道拱顶下沉及净空收敛进行监测^[6]。每个测试断面的测点布置如图 9 所示,包括一个拱顶下沉点及两条水平收敛测线。水平收敛测线一布置在

拱部,在隧道未变形前,测线长度为 646 cm;水平收敛测线二布置在内轨顶面以上 1 m 的边墙位置,在隧道未变形前,测线长度为 714 cm。

3.2 隧道围岩变形监测结果分析

根据现场实测得到的数据,经过计算,求得累计量测时间、隧道水平收敛差值、累计收敛差值、拱顶下沉差值、累计拱顶下沉值等。在此基础上,绘制出量测断面测线的收敛差值与时间关系曲线等,进行回归分析,找出被测物理量随时间变化的规律^[7-8]。

在分析各测线收敛值时,在每个测试项目都选用 10 个典型断面的测试结果进行分析。由于测试数据随时间的增长都是发散的,分别用式(1)~式(3)对其收敛值进行回归分析,选用精度最高的函数形式,并对 40 d 后收敛值进行预测,计算结果见表 2。

$$u = A + Bt, \quad (1)$$

$$u = A \lg(1+t), \quad (2)$$

$$u = A + B \ln t. \quad (3)$$

式中: u 为巷道收敛值; A, B 为回归系数; t 为监测时间。

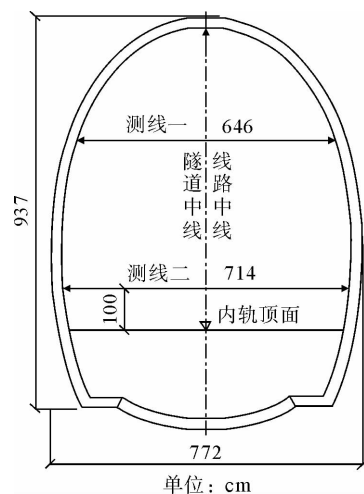


图 9 测点布置示意图

Fig. 9 The sketch of arrangement of monitoring points

表 2 各测线最小收敛值对比分析表

Tab. 2 The contrast analysis of minimum convergence values of measuring lines

监测项目	最小累计收敛值/mm	监测历时/d	收敛速率/(d/mm)	最高精度回归方程	40 d 预测值/mm	收敛控制值/mm	40 d 预测值/收敛控制值
测线一	82.08	28.72	2.86	$u = -30.98 + 51.94 \ln t$	160.71	129	1.25
测线二	86.08	18.04	4.77	$u = -3.79 + 29.06 \ln t$	103.41	143	0.72
拱顶下沉	5.80	13.25	0.44	$u = 0.01 + 2.07 \ln t$	7.64	103	0.07

由表 2 结果可知,测线一、测线二各断面的最小累计收敛值都超过了收敛控制值的 2/3,根据《铁路隧道监控量测技术规程》,此时位移管理等级为 I 级,应及时采取可靠的加固措施,优化开挖方式,方可继续施工。

3.3 监测结果沿隧道纵向的分布规律

为全面掌握整个隧道炭质页岩地段的围岩变形特性,便于进一步研究其支护措施,统计分析了以下三项内容^[5]:最大累计变形量沿隧道纵向的分布规律(图 10)、最大变形速率沿隧道纵向的分布规律(图 11)、最大变形速率与最大累计变形量的相关性(图 12)。由图中可知以下结果。

1)最大累计变形量发生在边墙部位,拱脚处次之,拱顶最小,这说明在炭质页岩地段,水平地应力明显大于垂直地应力,即侧压力系数大于 1。因此,在进行隧道支护时,重点要控制边墙的水平位移,如在增强支护强度的同时,采取设置临时仰拱、尽早封闭支护结构等措施。

2)变形严重的区段在 DK110+600~DK110+800 之间,最大累计变形量达 540 mm,最大变形速率达 70 mm/d。

3)最大变形速率沿隧道纵向的分布规律同最大累计变形量的分布规律基本相同,即边墙部位的水平收敛速率最大,拱脚部位的水平收敛速率次之,而拱顶下沉速率最小。

4)最大变形速率与最大累计变形量的关系与围岩条件、支护参数、支护时机、施工方法等密切相关,离散性较大,但也存在一定的相关性。如图 12 所示,最大累计变形量与最大变形速率成正比关系,最大累计变形量在数值上是最大变形速率的 6~10 倍。

4 结论

1)松桂 1 号隧道大变形地段穿越的主要围岩是页片状~薄层状的炭质页岩、泥岩,层间结合差,且强度

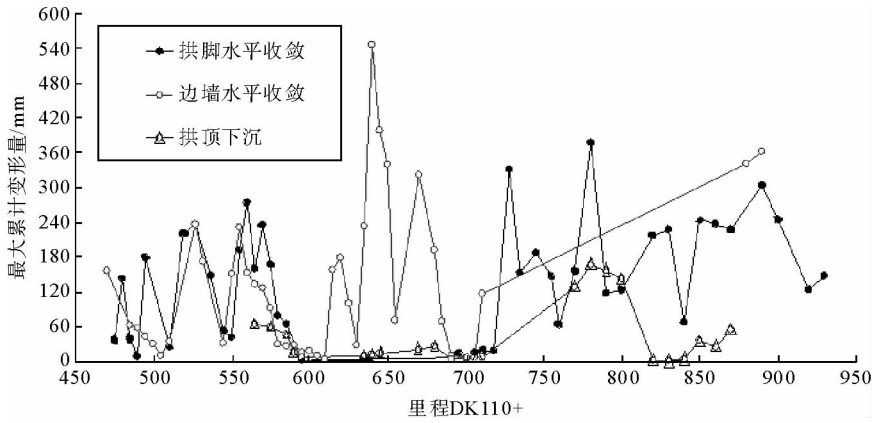


图 10 最大累计变形量沿隧道纵向的分布规律图

Fig. 10 The distribution rule of the maximum accumulative deformation along the lengthwise tunnel

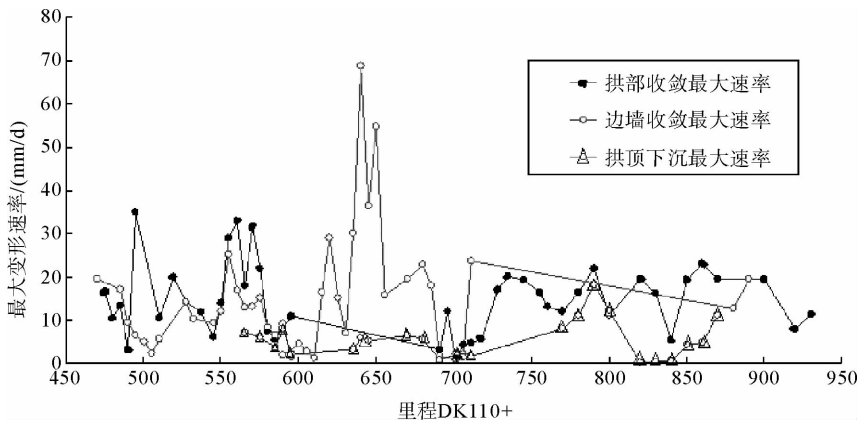


图 11 最大变形速率沿隧道纵向的分布规律图

Fig. 11 The distribution rule of the maximum deformation rate along the lengthwise tunnel

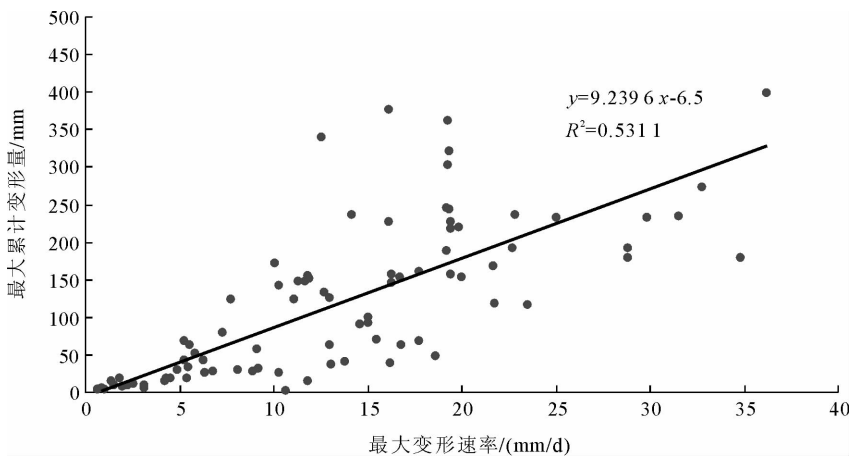


图 12 最大变形速率与最大累计变形量的相关性图

Fig. 12 The correlation diagram of the maximum deformation rate and maximum accumulative deformation

低、易风化,崩解性强;自由膨胀率高、膨胀压力大;炭质页岩层理结构的方向性对隧道的稳定性有巨大的影响,尤其是垂直层理,最不利于隧道的稳定,在设计和施工中应当特别注意。

2) 现场量测资料显示:大变形地段围岩的变形值均超过了 15 cm,最大变形量达 54 cm;且变形速率快,最大变形速率达 70 mm/d;变形形式有拱顶下沉、侧壁挤入等。根据《铁路隧道大变形划分标准》中的管理值,松桂 1 号隧道的围岩变形达到了 I 级大变形等级,必须对其进行特殊设计,并采取相应的施工对策,方可确保整个隧道的施工安全。

3) 大变形地段隧道的水平收敛变形明显大于拱顶下沉,说明该地段水平地应力大于垂直地应力,在进行隧道支护时,要重点控制边墙的水平位移。

4) 通过对松桂 1 号隧道现场监控量测,选用精度最高的函数形式 $u = A + B \ln t$ 对围岩最终变形量进行了预测,为合理地设置预留变形量提供了依据。

参考文献:

- [1] 川本眺万. ひずみ软化を考慮した岩盤掘削の解析[C]//土木学会论文集. 1981;107-117.
TOSHIKAZU K. An analysis of excavation in strain-softening rock mass[C]//Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers. 1981;107-117.
- [2] DEMS K, MROZ Z. Stability condition for brittle plastic structure with propagation damage surface[J]. Journal of Structure Mechanics, 1985, 13(1): 85-122.
- [3] 解廷堃, 李二利, 刘如成. 炭质页岩常规三轴试验和本构方程的研究[J]. 露天采矿技术, 2008(6): 7-10, 12.
XIE Tingfang, LI Erli, LIU Rucheng. Research on carbonaceous shale general tri-axial test and constitutive equation[J]. Opencast Mining Technology, 2008(6): 7-10, 12.
- [4] 王梦恕. 隧道工程浅埋暗挖法施工要点[J]. 隧道建设, 2006, 26(5): 1-4.
WANG Mengshu. Outline of tunnel construction by means of method of undercutting with shallow overburden[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(5): 1-4.
- [5] 韩毅, 李隽蓬. 铁路工程地质[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1995.
- [6] 贾剑青, 王宏图, 刘大鹏, 等. 隧洞地表稳定性监测及计算分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3765-3770.
JIA Jianqing, WANG Hongtu, LIU Dapeng, et al. Monitoring and analysis of tunnel surface stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3765-3770.
- [7] 李树忱, 李术才, 徐帮树. 隧道围岩稳定分析的最小安全系数法[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 549-554.
LI Shuchen, LI Shucai, XU Bangshu. Minimum safety factor method for stability analysis of surrounding rockmass of tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 549-554.
- [8] 宋玉香, 贾晓云, 朱永全. 地铁隧道竖向土压力荷载的计算研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2240-2244.
SONG Yuxiang, JIA Xiaoyun, ZHU Yongquan. Study on vertical earth pressure calculation of metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2240-2244.