

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.12.012

隧道单层衬砌结构稳定性现场试验及变形控制

杜国平^{a,b}, 刘新荣^{a,b,c}, 李晓红^c, 杨欣^{a,b}, 刘坤^{a,b}

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室;
c. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:从研究隧道单层衬砌结构的支护稳定性入手,以现场实验手段,对工作过程中锚杆、纤维混凝土以及其与围岩相互作用的力学原理进行了系统研究,对单层衬砌在隧道工程实际应用中的力学性能进行了测量,在此基础上阐述了隧道单层衬砌机理,并最终应用于工程实践,初步形成一套具有理论支撑的单层衬砌设计方法。认为纤维混凝土与围岩密贴效果良好,表明提出的单层衬砌设计方法在保证工程质量和安全方面是可行的,支护结构的工作性状可靠。

关键词:单层衬砌;现场实验;变形控制

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2013)12-079-07

Field test and deformation controlling for single tunneling lining stability

DU Guoping^{a,b}, LIU Xinrong^{a,b,c}, LI Xiaohong^c, YANG Xin^{a,b}, LIU Kun^{a,b}

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education; c. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The construction process of anchor, fiber concrete and its mechanical principle of interaction with surrounding rocks is studied by field tests from the view of researching stability of single layer tunneling lining. The mechanical properties of single layer lining in the practical application of tunnel engineering are measured. On the basis of this study, the mechanism of single layer tunnel lining is discussed, which is finally applied to the engineering practice, formatting a set of theoretical support for the design method of single layer lining. Studies found that close effect between fiber reinforced concrete and rock is well, which shows that the single layer lining design method to ensure quality and safety proposed in this paper is feasible, and construction characteristic of retaining structure is reliable. The method can be widely applied in engineering practice, and has remarkable economic benefit and social benefit.

Key words: single shell lining; field test; deformation controlling

收稿日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50334060); 国家自然科学基金创新群体基金(50621403)

作者简介: 杜国平(1966-), 男, 博士生研究, 教授级高级工程师, 主要从事高速公路研究、建设与管理等工作,
(E-mail) gfsdgp@sina.com。

单层衬砌(single shell lining)是一种新兴的隧道支护体系,开始于 19 世纪 70 年代,随着近年来施工技术水平的不断发展,尤其是喷射混凝土施工工艺发展,喷射混凝土质量得到保证,该技术得到了广泛的发展和运用。瑞典和挪威较早地使用了单层衬砌,其中,在挪威 460 km 左右的干线公路隧道中,采用了喷射混凝土或钢纤维混凝土作为永久衬砌共有 160 km(部分是海底隧道)^[1],单层衬砌技术在瑞典斯德哥尔摩地铁中的各个区域如地铁区间、地铁车站地铁换乘大厅、车站的连接通道和换乘通道等得到了广泛地发展和应用。单层衬砌技术在瑞士的费尔艾哪隧道中的使用率大约占到 97%^[2]。德国的慕尼黑地铁也取消了内层模筑混凝土和隔水板的施工技术,而选择了喷射混凝土做单层衬砌的方式^[3]。在 19 世纪 80 年代~90 年代,巴西在大量的砂粘土和陡峭多孔性粘土地区采用喷射混凝土作为永久衬砌^[3]。法国从上世纪 80 年代引进钢纤维喷射混凝土技术作为隧道衬砌,并在 1990 年将之作为隧道永久衬砌。在美国肯塔基州的哈伦,1 条内径 10.4 m 的泄洪隧洞亦采用了钢纤维喷射混凝土作为永久衬砌^[4]。同样,单层衬砌技术在日本的公路、铁路隧道以及诸多欧洲国家都得到了广泛应用^[5]。

中国在 1960 年代修建的成昆铁路,在其中围岩较好的隧道中,就成功地运用了喷射混凝土加锚杆的单层衬砌技术。1999 年,在汕头野花石油气储库工程中单层衬砌支护技术得到了应用并取得了较好的效果^[6]。铁路隧道中,西康铁路线中的秦岭隧道中有 1 220 m^[7]采用了喷射钢纤维混凝土单衬,高踞沟隧道采用喷射钢纤维混凝土单衬长达 289 m^[8],而在磨沟岭隧道中,永久单层衬砌采用了模筑钢纤维混凝土^[9]。

单层衬砌技术不仅可应用于各种隧道工程,同时在地下工程中也可广泛应用^[10-11]。目前国内外单层衬砌技术在软弱围岩和硬质围岩中都已经有了广泛的应用,但是对于隧道单层衬砌用混凝土及单层衬砌结构稳定性的研究甚少,尤其是具有许多优点的聚丙烯纤维增强混凝土机理的研究就更少^[12]。

1 单层衬砌结构现场实验

关长山隧道位于重庆木洞镇与双河镇交界处,为双向行驶两车道公路隧道,隧道全长 885 m,属于中长隧道。隧道进口高程约为 235.11 m,出口高程约为 239.88 m,隧道设计线进口和洞身位于直线

上,出口位于 $R=627.947$ m 的圆曲线和缓和曲线上。隧道设计坡线为双向坡(+1.1%/330, -0.92/555),最大埋深为 120 m。隧道周围地层主要为粉砂质泥岩,紫红色,多由粘土矿物组成,含砂质约 20%左右,灰夹绿色钙质结核及多层乳白色约为 1~2 mm 厚的石膏薄膜,砂泥质结构,中层状构造。

1.1 测试方案

单层衬砌试验段选择在 K23+525~K23+775 段,在该里程段隧道穿越侏罗系上统遂宁组地层,岩性为粉砂质泥岩,地下水呈点滴状出水,隧道处于深埋状态。为全面掌握单层衬砌试验段的围岩分布特征和结构的受力特征,总计布置了 4 个典型断面:即 K23+698.7、K23+715、K23+730、K23+745。本段隧道开挖采用上下台阶法开挖施工,上部开挖后埋设拱顶及左、右拱腰处测试元件,下部断面开挖后再埋设左、右边墙处的测试元件。每个断面的测试项目及所用仪器见表 1 所示。

表 1 典型断面的量测项目及所用元件

量测断面里程	量测项目	测试元件
K23+697.7	围岩与喷射砼层接触压力;喷射混凝土应力;格栅钢架内主筋应力。	压力盒;混凝土应变计;钢筋应力计。
K23+715	围岩与喷射砼层接触压力;喷射混凝土应力;格栅钢架内主筋应力;锚杆轴力。	压力盒;混凝土应变计;钢筋应力计;锚杆轴力计。
K23+730	围岩与喷射砼层接触压力;喷射混凝土应力;格栅钢架内主筋应力。	压力盒;混凝土应变计;钢筋应力计。
K23+745	围岩与喷射砼层接触压力;喷射混凝土应力;格栅钢架内主筋应力;锚杆轴力。	压力盒;混凝土应变计;钢筋应力计;锚杆轴力计。

现场测试元件的埋设分两种类型:断面 K23+698.7 及 K23+745 元件的埋设采用图 1 的形式;断面 K23+715 及 K23+730 元件的埋设采用图 2 的形式。

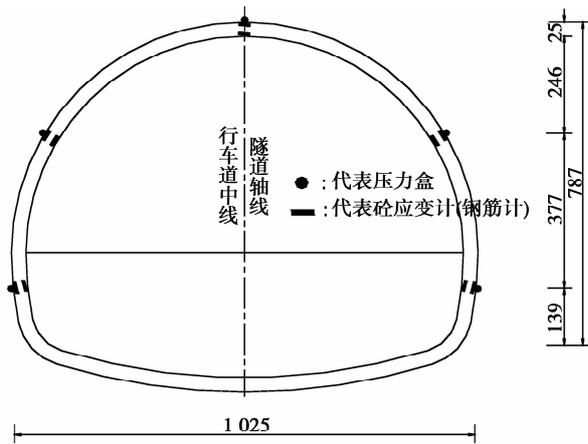


图 1 断面 K23+698.7 及 K23+745 元件的埋设

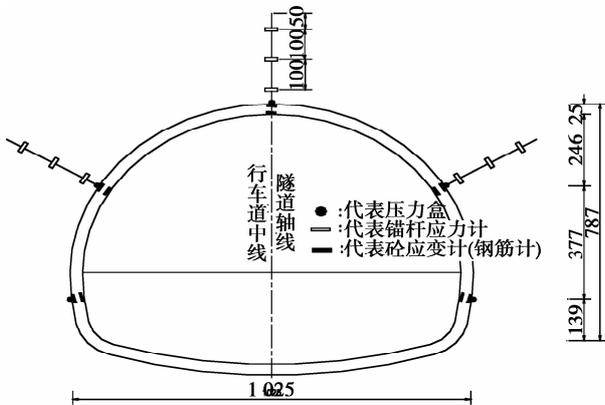


图 2 断面 K23+715 及 K23+730 元件的埋设

锚杆作为隧道单层衬砌支护技术中的主动支护体系,从加强围岩自身承载力出发进行围岩的加固,在系统中有重要的作用。因此,在现场实验中,特别增加了锚杆轴力的监测,在断面 K23+715.6 和 K23+745 的拱顶、左、右拱腰分别安装了锚杆轴力计,锚杆上传感器的布置见图 3 所示。

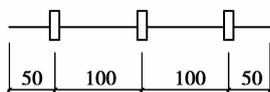


图 3 锚杆上传感器布置示意图

1.2 测试结果与分析

1.2.1 K23+698.7 断面测试结果与分析

K23+698.7 断面所处围岩岩性为粉砂质泥岩,隧道埋深约为 55 m。按埋设顺序,其测试结果和综合分析如下所述。

1) 围岩与喷射混凝土层接触压力

测试结果如图 4 所示,可以看出:除左边墙测点,断面各埋设点的围岩与喷射砼层接触压力量

测值都为正值,表明均为受压,测试值一般在施工结束后 20 d 基本稳定。右拱腰位置的接触压力量测值为最大,为 0.131MPa;左拱腰最大值为 0.098 MPa;拱顶最大值为 0.064 MPa;而左侧边墙部位的接触压力受压最大值仅为 0.01MPa。总体来看,实测到的围岩压力绝对值都比较小。

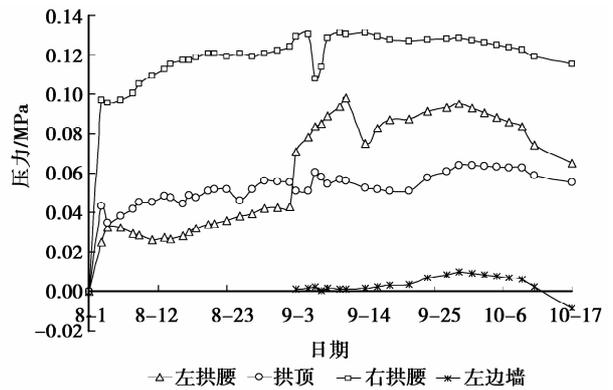


图 4 K23+698.7 断面围岩压力测试结果

2) 格栅钢架内主筋应

测试结果如图 5 所示,可以看出:格栅钢架内主筋除在左拱腰外侧受拉外,其余部位只承受压力,且在施工完成后 30 d 基本稳定。在断面中,左拱腰外侧、左拱腰内侧、拱顶外侧、拱顶内侧、右拱腰外侧、左边墙外侧、左边墙内侧、右边墙外侧、右边墙内侧部位钢筋应力最大值分别为:1.14、0.86、0.64、0.41、0.9、0.07、0.32、0.06、0.08 MPa。另外,左边墙外侧部位钢筋应力初期出现拉应力最大值,为 0.05 MPa;左拱腰外侧位置的钢筋应力量测值最大,压应力值为 1.14 MPa;总体而言,格栅钢架应力都很小。

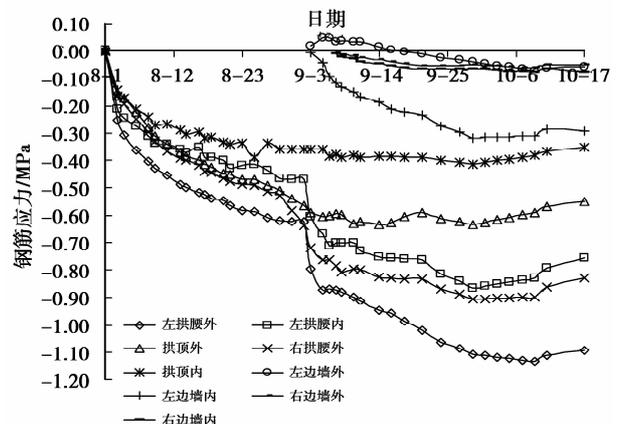


图 5 K23+698.7 断面钢筋应力测试结果(受拉为正)

3) 喷射混凝土内应力

测试结果如图 6 所示,可以看出:本断面左拱腰外侧位置的混凝土内应力测量值最大,最大值为 9.83 MPa;左拱腰内侧、拱顶外侧、右拱腰外侧、右拱腰内侧、左边墙外侧、左边墙内侧、右边墙外侧、右边墙内侧部位混凝土内应力最大值分别为: -2.27、2.04、4.58、3.81、0.69、2.52、-1.02、0.72 MPa。在左拱腰内侧及右边墙外侧出现了拉应力,但应力值相对较小,总体而言,各埋设点的应力均小于混凝土设计强度。

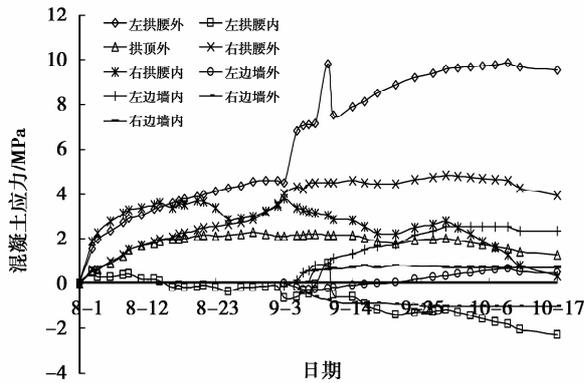


图 6 K23+698.7 断面混凝土应力测试结果(受压为正)

1.2.2 K23+715 断面测试结果与分析

K23+715 断面所处围岩岩性为粉砂质泥岩,隧道埋深约为 65 m。按埋设顺序,其测试结果和综合分析如下所述。

1) 围岩与喷射混凝土层间接触压力

测试结果如图 7 所示,可以看出:从 K23+175 断面围岩与喷射混凝土间均以压应力为主,且压应力值较小,表明单层衬砌与围岩共同变形释放了部分围岩压力。断面左拱腰位置的接触压力最大值为 0.294 MPa;右拱腰最大值为 0.107 MPa;拱顶最大值为 0.034 MPa;左侧边墙部位的接触压力最大值为 0.031 MPa,左侧边墙部位的接触压力最大值为 0.045 MPa。

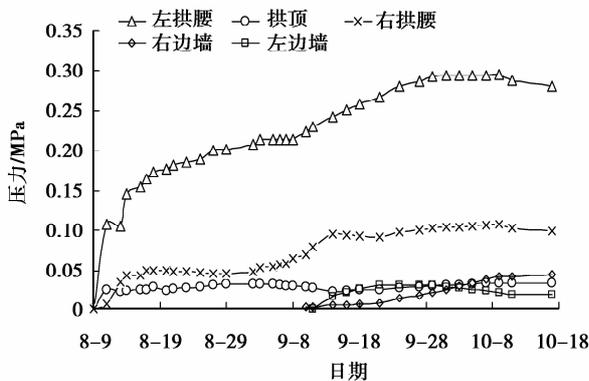


图 7 K23+715 断面测试围岩压力图

为 0.031 MPa,左侧边墙部位的接触压力最大值为 0.045 MPa。

2) 格栅钢架内主筋应力

测试结果如图 8 所示,可以看出:断面各埋设点的格栅钢架应力测量值都为负值,左拱腰外侧、左拱腰内侧、拱顶外侧、拱顶内侧、右拱腰外侧、右拱腰内侧、左边墙外侧、左边墙内侧、右边墙外侧、右边墙内侧部位钢支撑应力最大值分别为: 0.7、0.75、0.45、0.49、1、0.71、0.14、0.28、0.22、0.28 MPa;右拱腰外侧位置的格栅钢架主筋应力测量值最大,其值为 1 MPa。总体而言,格栅钢架主筋的应力值均较小,表明格栅钢架、喷射混凝土和围岩在共同变形过程中,分担的力较少。

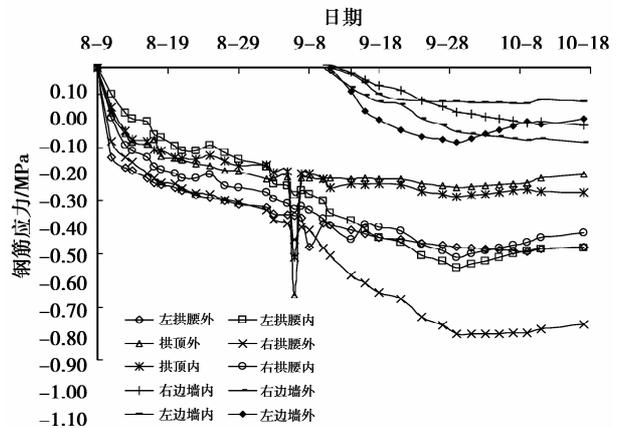


图 8 K23+715 断面钢筋应力曲线(受拉为正)

3) 喷射混凝土内应力

测试结果如图 9 所示,可以看出:断面各测点的量测值在施工完成 30 d 后基本趋于稳定,左拱腰外侧、左拱腰内侧、拱顶外侧、右拱腰外侧、右拱腰内侧、左边墙外侧、左边墙内侧、右边墙外侧、右边墙内侧部位混凝土内应力最大值分别为: 3.04、0.31、6.99、2.51、2.72、0.73、2.76、0.01、1.59 MPa。在

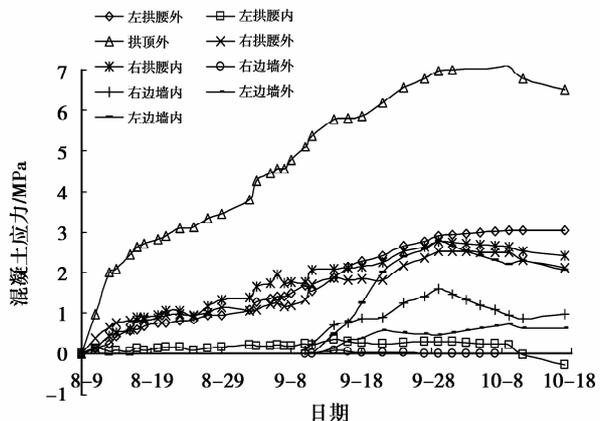


图 9 K23+715 断面混凝土应力曲线(受压为正)

所有监测部位中,拱顶外侧的混凝土内应力量测值为最大,其值为 6.99 MPa。总体而言,各埋设点的应力均小于混凝土设计强度。

4) 锚杆轴力量测

为掌握锚杆的受力特征,在断面 K23+715 的拱顶、左、右拱腰分别安装了锚杆轴力计进行现场测试,图 10、图 11 及图 12 分别为左拱腰、右拱腰及拱顶锚杆的轴力实测值。

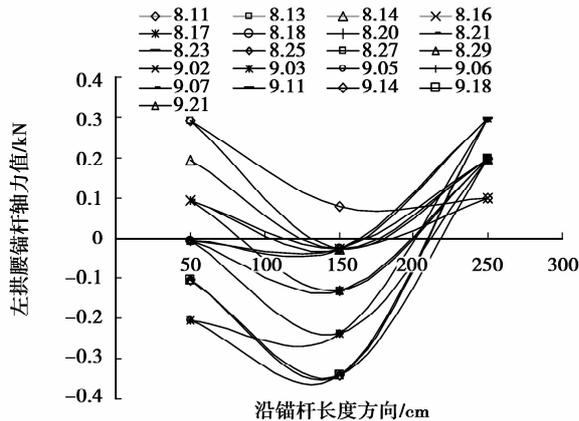


图 10 K23+715 断面左拱腰锚杆实测轴力图(受拉为正)

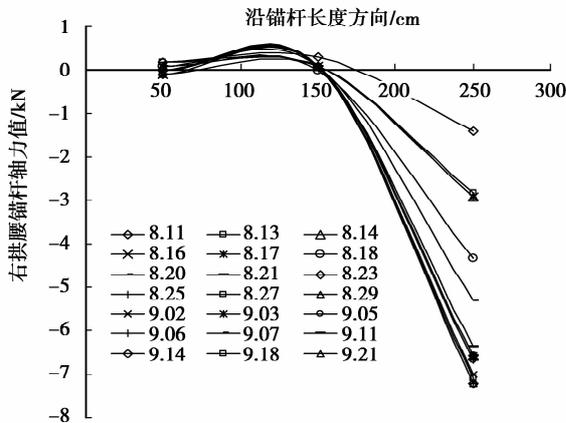


图 11 K23+715 断面右拱腰锚杆轴力曲线(受拉为正)

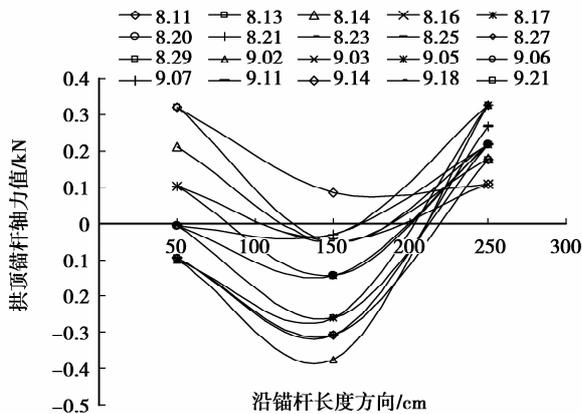


图 12 K23+715 断面拱顶锚杆轴力曲线(受拉为正)

可以看出:随着时间的推移,左拱腰部位的锚杆轴力性质会发生转化,主要表现为临空面侧至锚杆中部的轴力会由初期的受压状态转化为受拉状态;而在远离隧道一侧锚杆端部的轴力一直保持为受拉;实测的轴力值中,最大压力值为 0.34 kN,最大拉力值为 0.3 kN。

同样,右拱腰的锚杆轴力亦会随着时间的推移,呈现与左侧拱腰锚杆相同的轴力转化;而在远离隧道一侧锚杆端部的轴力一直保持为受压;实测的轴力值中,最大压力值为 7.21 kN,最大拉力值为 0.29 kN。

而拱顶的锚杆从锚杆中部至临空面侧同样表现为受压向受拉转化的特性;而在远离隧道一侧锚杆端部的轴力一直保持为受拉;实测的轴力值中,最大压力值为 0.38 kN,最大拉力值为 0.33 kN。

总体而言,对于左拱腰及拱顶部位,轴力值无论正或负,其绝对数值都很小,最大拉力值为 0.32 kN,最大压力值为 0.09 kN,这主要是锚杆孔内压注的水泥砂浆在凝结硬化过程中产生的收缩引起的;而对于右拱腰部位,最大轴力值为 7.21 kN,且处于受压状态,这是由于围岩变形所引起的。

2 单层衬砌变形控制

监控量测是地下工程、隧道工程施工中不可或缺的内容,是新奥法施工的“眼睛”,隧道施工监控量测为识别结构工作状态,支护手段的合理性,施工方法的选择及支护设计参数的可行性提供了现场数据支撑,在保证施工安全质量的前提下,为后续隧道工程施工提供较好的经验支持。

在关长山隧道单层衬砌试验段,共布置了 6 个监测断面:K23+668、K23+683、K23+702、K23+726、K23+741、K23+759。在每个监测断面布置 3 个拱顶下沉点,2 条水平测线,测线布置如图 13 所示。

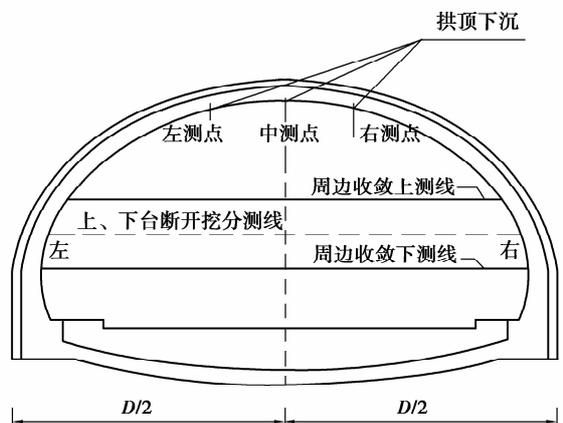


图 13 测线布置示意图

K23+668 断面埋深约 160 m, 监测结果如下:

1) 周边收敛

收敛位移-时间曲线和收敛速率-时间曲线分别如图 14 和图 15 所示。

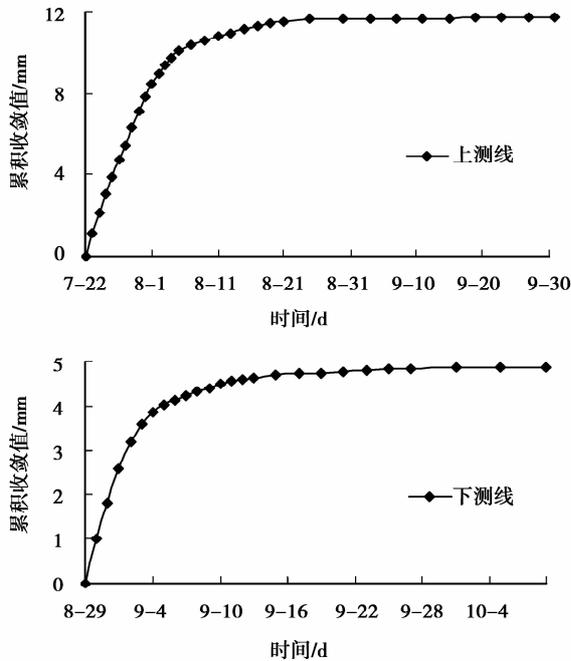


图 14 K23+668 断面周边收敛变化曲线图

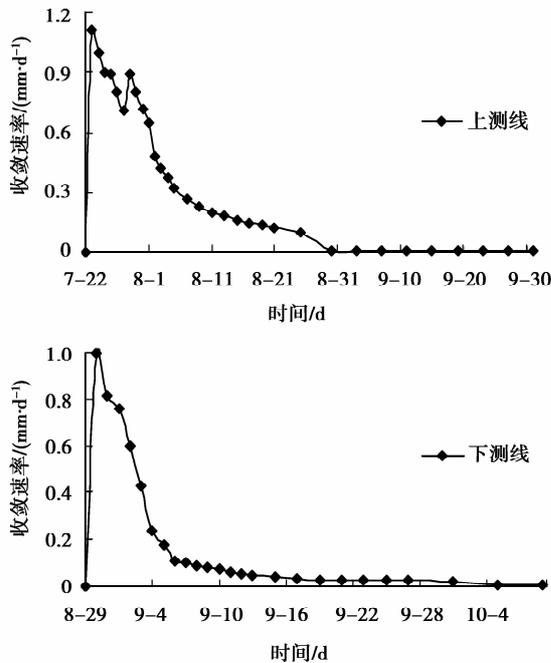


图 15 K23+668 断面周边收敛速率变化曲线图

上测线收敛值在测点埋设后的前 11 d 呈快速增长, 其值达 8.493 mm; 而在第 12~33 d 间, 则属

缓慢增长阶段; 随后, 趋于稳定状态, 最终收敛值为 11.704 mm。

下测线在测点埋设后的前 6 d, 收敛值增长较快, 累计为 3.607 mm, 第 7~16 d 时增长较为缓慢; 随后处于稳定状态, 最终收敛值为 9.276 mm。上测线收敛速率在测点埋设后的第 2 d 增长最大, 其值达到 1.118 mm, 随后总体呈逐渐减小趋稳状态, 最后趋于 0.006 mm; 下测线收敛速率在测点埋设后的第 2 d 增长最大, 其值达到 0.999 mm, 随后总体呈逐渐减小状态, 最后趋于 0.006 mm。

2) 拱顶下沉位移

图 16 和图 17 分别为监测断面 K23+668 处的拱顶下沉位移-时间曲线和下沉速率-时间曲线。

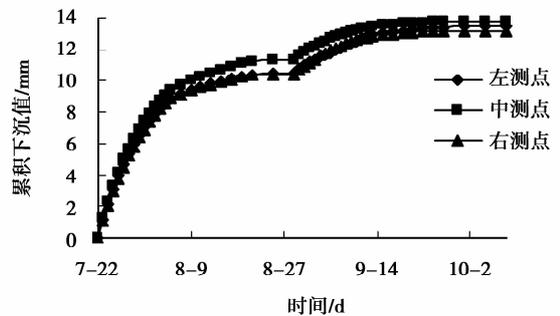


图 16 K23+668 断面拱顶下沉时间变化曲线图

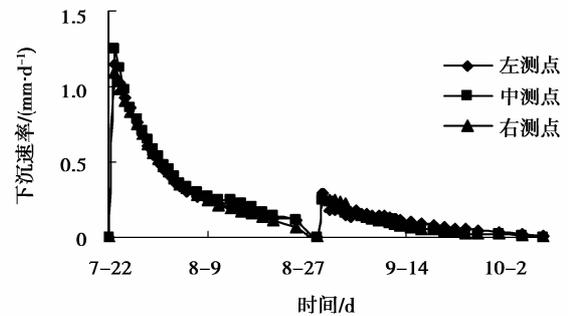


图 17 K23+668 断面拱顶下沉速率变化曲线图

左、中、右 3 个测点下沉量在测点埋设后的第 15 d, 累计值分别达 8.87、9.45、8.85 mm; 在第 16 d 后呈缓慢增长并趋稳, 到下台阶开挖后第 13 d 内, 呈缓慢增长状态, 随后趋于稳定阶段, 最后稳定收敛值分别为 13.46、13.80、13.17 mm; 3 个测点在埋设后的前 2 d 下沉速率最大, 其值分别达到 1.15、1.25、1.09 mm, 随后总体则呈逐渐减小状态; 下台阶开挖后出现继续增长, 随后一段时间总体呈逐渐减小并回落, 到下测点埋设第 26 d 后, 速率平均趋于 0.003 mm。

3 结 论

从以上图中各段监测断面混凝土喷层位移随时间变化的曲线中可以看出:围岩与喷射砼层接触压力测量值都为正值,均为受压,测试值在施工结束后 20 d 基本稳定;格栅钢架内主筋大多承受压力,且在施工完成后 30 d 基本稳定;喷射混凝土内应力各测点的量测值在施工完成 30 d 后基本趋于稳定,混凝土内应力均小于混凝土设计强度;锚杆轴力量测随着时间的推移,拱腰部位的锚杆轴力性质会发生转化,主要表现为临空面侧至锚杆中部的轴力会由初期的受压状态转化为受拉状态,而在远离隧道一侧锚杆端部的轴力一直保持为受拉。

通过在实体隧道施工现场的实验,对变形控制技术进行了研究,表明文中提出的单层衬砌设计方法在保证工程质量和安全方面是可行的,支护结构的工作性状是可靠的,能在工程实际中得到广泛应用及推广,具有一定的理论和现实意义。

参考文献:

- [1] N. 巴顿, E. 格里梅斯坦德. 选择挪威法还是新奥法取决于岩体状态[J]. 马积薪, 译. 世界隧道, 1995(5): 25-31.
Barton N, Grimstad E. Rock mass conditions dictate choice between NMT and NATM [J]. Tunnels & Tunnelling, 1995(5): 25-31.
- [2] H. 亨切尔. 费尔艾那隧道工程情况[J]. 王彬, 译. 隧道译丛, 1994(7): 22-26.
Hentschel H. Vereina tunnel engineering situation[J]. Tunnel, 1994(7): 22-26.
- [3] 吴成三. 及时掌握单层衬砌技术, 降低隧道工程造价[J]. 铁道标准设计, 1996(12): 1-3.
WU Chengsan. Grasp the technology of single layer lining tunnel, reduce project cost[J]. Railway Standard Design, 1996(12): 1-3.
- [4] Franzent T. Shotcrete for underground support; a state-of-the-art report with focus on steel-fiber reinforcement [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1992, 7(4): 381-391.
- [5] 王志杰. 喷射钢纤维混凝土及其在隧道和地下工程中的应用[J]. 公路, 2004(1): 145-148.
WANG Zhijie. Steel fiber reinforced shotcrete and its application in tunnel and underground engineering [J]. Highway, 2004(1): 145-148.
- [6] 李友强. 挪威法(NMT)在汕头液化石油气储库工程中的应用[J]. 世界隧道, 2000(6): 17-23.
LI Youqiang. Application of NMT to Shantou LPG cavern project [J]. World Tunnel, 2000(6): 17-23.
- [7] 陈智. 秦岭隧道喷射钢纤维混凝土衬砌抗压、抗拉强度分析[J]. 岩土工程界, 2001, 4(11): 57-59.
CHEN Zhi. Analysis of steel fiber concrete lining compressive and tension strength of Qingling mountain tunnel [J]. Geological Exploration for Non-ferrous Metals, 2001, 4(11): 57-59.
- [8] 梁国臣. 西康铁路高碛沟隧道湿喷钢纤维混凝土施工[J]. 施工技术, 2001, 30(5): 23-39.
LIANG Guochen. Permanent steel fiber shotcrete construction in Gaobiangou tunnel of XiKang railway [J]. Construction Technology, 2001, 30(5): 23-39.
- [9] 付卫新. 模筑钢纤维混凝土在磨沟岭隧道中的应用[J]. 隧道建设, 2003, 23(2): 39-41.
FU Weixin. Application of cast-in-place steel fiber reinforced concrete in the Motianling tunnel[J]. Tunnel Construction, 2003, 23(2): 39-41.
- [10] 王明华, 杨良策, 刘汉超, 等. 大型地下洞室顶板稳定性的岩体结构控制效应[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 483-487.
WANG Minghua, YANG Liangce, LIU Hanchao, et al. Control effect of rock mass structure on stability of top slab for underground tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 483-487.
- [11] 贺少辉, 马万权, 曹德胜, 等. 隧道湿喷纤维高性能混凝土单层永久衬砌研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3509-3517.
HE Shaohui, MA Wanquan, CAO Desheng, et al. Permanent single-layer tunnel by fiber reinforced high performance shotcrete and wet-mix method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(20): 3509-3517.
- [12] 张俊儒, 仇文革. 隧道单层衬砌研究现状及评述[J]. 地下空间与工程学报, 2006(4): 693-699.
ZHANG Junru, CHOU Wenge. Present status and comments of tunnel single lining [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006(4): 693-699.
- [13] 刘新荣, 祝云华, 李晓红, 等. 隧道钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 19-23.
LIU Xinrong, ZHU Yunhua, LI Xiaohong, et al. Experimental research on single-layer tunnel lining of steel fiber shotcrete [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 19-23.
- [14] 曹康建. 湿喷钢纤维混凝土在隧道单层衬砌中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(3): 83-86.
CAO Kangjian. Application of fiber reinforced shotcrete in single layer tunnel lining [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(3): 83-86.
- [15] 吴建军. 破碎围岩条件下铁路隧道单层衬砌结构力学特征研究[J]. 铁道工程学报, 2011(4): 53-57.

- [12] 汪纪峰,罗远桥.一种基于跟踪误差变化率的动态矩阵控制算法[J].重庆大学学报,2005,26(6):71-74.
WANG Jifeng, LUO Yuanqiao. Predictive control algorithm based on the track error rate [J]. Journal of Chongqing University, 2005, 28(6):71-74.
- [13] 王剑.一种改进的模型算法控制[J].控制与决策,2000,15(2):245-247.
WANG Jian. An improved model algorithmic control[J]. Control and Decision,2000,15(2):245-247.
- [14] 郭伟,姚少杰.基于时域的PID动态矩阵控制算法改进[J].仪器仪表学报,2007,28(12):2174-2178.
GUO Wei, YAO Shaojie. Improved PID dynamic matrix control algorithm based on time domain [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(12):2174-2178.
- [15] 温敬红.基于时域的分阶数PID动态矩阵控制算法研究及其应用[D].南京:南京信息工程大学硕士学位论文,2011.
- [16] 李嗣福. MAC 和 DMC 的算法改进[J].自动化学报,1993,19(4):414-419.
LI Sifu. Improvement algorithms of MAC and DMC [J]. Acta Automatica Sinica, 1993, 19(4):414-419.
- [17] 李玉红,刘红军,等.一种新型的动态矩阵控制算法及仿真研究[J].计算机仿真,2005,22(2):103-109.
LI Yuhong, LIU Hongjun, et al. A new dynamic matrix control algorithm [J]. Computer simulation, 2005, 22(2):103-109.
- [18] 平续斌,丁宝苍,韩崇昭.动态输出反馈鲁棒模型预测控制[J].自动化学报,2012,38(1):31-37.
PING Xubin, DING Baocang, HAN Chong zhao. Dynamic output feedback robust model predictive control [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(1):31-37.

(编辑 侯 湘)

~~~~~

(上接第 85 页)

- WU Jianjun. Study on mechanical characteristics of single layer lining of railway tunnel under condition of fractured surrounding rock [J]. Journal of Railwan Engineering Society,2011(4):53-57.
- [16] 仇文革,冯冀蒙,陈雪峰,等.深埋硬岩隧道初期支护劣化衬砌力学试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(1):72-77.  
CHOU Wenge, FENG Jimeng, CHEN Xuefeng, et al. Model testing research on lining mechanical variation with deterioration process of primary support in deep hard rock tunnel [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(1):72-77.

(编辑 陈移峰)