

文章编号:1673-2049(2011)01-0100-06

黄土隧道浅埋偏压洞口段套拱 结构受力监测与分析

陈建勋¹, 乔 雄^{1,2}

(1. 长安大学 陕西省公路桥梁与隧道重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:为了解黄土隧道浅埋偏压洞口段套拱结构的受力状况,对刘家坪 2 号隧道洞口段套拱基底应力、钢架应力、混凝土应力及拱顶下沉进行施工监测,并对监测结果进行分析。结果表明:浅埋偏压情况下,套拱两侧基底应力分布不均匀,拱顶填土引起基底应力急剧增长,仰拱施作后基底应力趋于稳定;套拱钢架受力复杂,有拉有压,且值很大,仰拱开挖引起钢架应力急剧增长,钢架在套拱支护结构中发挥了强大的支护作用;冬、夏季温差引起套拱混凝土应力随时间(季节)的变化呈现拉、压交替变化,夏季出现最大压应力,冬季出现最大拉应力,且压应力较小,拉应力较大,多处测点都超过了 C25 模筑混凝土设计轴心抗拉强度;套拱拱顶下沉主要由洞顶填土施工和仰拱开挖引起。

关键词:隧道工程;黄土;浅埋偏压;套拱;监测

中图分类号:U451.2 **文献标志码:**A

Mechanical Monitoring and Analysis of Umbrella Arch Structure in Shallow-buried Bias Loess Tunnel Entrance

CHEN Jian-xun¹, QIAO Xiong^{1,2}

(1. Key Laboratory for Highway Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064,

Shaanxi, China; 2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology,

Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: In order to understand the structural mechanical properties of umbrella arch in shallow-buried bias loess tunnel entrance, stress of umbrella arch base, stress of steel frame, concrete stress and vault crown settlement were monitored and analyzed in tunnel entrance of Liujiaping 2[#] Tunnel. The results show that in shallow-buried bias tunnel, the stress distribution in the umbrella arch base is not uniform, and filling soil in the vault crown makes the stress of umbrella arch base increase rapidly, the stress of umbrella arch base tends to be steady after the contruction of inverted arch. Stress of steel frame of umbrella arch increases rapidly after the excavation of inverted arch, which is very complex, including tension and compression, and the value is large, support action of steel frame in the umbrella arch is significant. The umbrella arch is statically indeterminate structure, temperature difference in winter and summer makes concrete stress of umbrella arch alternatively change with the variation of time (season), compressive stress is maximum in summer and tensile stress is maximum in winter, and the compressive stress

收稿日期:2010-12-02

基金项目:国家西部交通建设科技项目(2007 318 812 68)

作者简介:陈建勋(1969-),男,陕西韩城人,教授,工学博士,E-mail:chenjx1969@163.com。

is small and the tensile stress is large. The tensile stresses in many measuring points are bigger than design axis tensile strength of C25 diecasting concrete. The vault crown settlement of umbrella arch is caused by filling soil in the vault crown and excavation of inverted arch.

Key words: tunnel engineering; loess; shallow-buried bias; umbrella arch; monitoring

0 引言

在中国西部地区黄土的覆盖面积达到了 $27 \times 10^4 \text{ km}^2$,随着中国西部地区公路交通事业的不断发展,出现了越来越多的黄土隧道。目前尽管已修筑了许多的黄土隧道,但是还没有一套完整的、成熟的设计与施工方法。黄土隧道浅埋偏压洞口段的设计和施工一直是黄土隧道建设中的难题^[1-4]。为了解黄土隧道浅埋偏压洞口段套拱结构的受力特性,笔者对吴堡—子洲段高速公路第 14 合同段内的刘家坪 2 号隧道洞口段的套拱进行施工监测,并对监测结果进行了分析。

1 工程概况

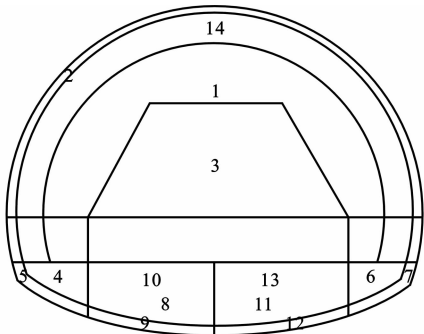
刘家坪 2 号隧道是国道主干线(GZ35)青岛—银川陕西境吴堡—子洲段高速公路第 14 合同段内的一座黄土隧道,隧道全长 340 m。隧址区地貌形态属黄土梁峁区峁状谷坡地形,地层以第四系黄土为主。隧道右线进口段存在浅埋偏压等不良地质现象,最小埋深仅 4 m,隧道洞口地形如图 1 所示。围岩上部为第四系全新统坡积次生黄土,土质疏松,松软结构,垂直节理发育,成洞性能较差,洞口下部为中更新统离石组老黄土。洞口开挖时易坍塌,处理不当会出现较大坍塌。

隧道洞口段属于Ⅵ级围岩,最大开挖跨度 12.52 m,采用分部开挖法(拱部留核心土环形开挖,如图 2 所示)施工。隧道套拱设计参数见表 1。



图 1 隧道洞口地形

Fig. 1 Topography of Tunnel Portal



- 1—拱部环形开挖; 2—拱部初期支护;
- 3—核心土开挖; 4—左侧边墙开挖;
- 5—左侧边墙初期支护; 6—右侧边墙开挖;
- 7—右侧边墙初期支护; 8—左侧仰拱开挖;
- 9—左侧仰拱初期支护; 10—左侧仰拱施作及回填;
- 11—右侧仰拱开挖; 12—右侧仰拱初期支护;
- 13—右侧仰拱施作及回填; 14—二次衬砌

图 2 隧道施工工序

Fig. 2 Tunnel Construction Steps

表 1 隧道套拱设计参数

Tab. 1 Design Parameters of Tunnel Umbrella Arch

构件	导向管	型钢钢架	纵向连接筋	模筑混凝土
设计参数	Φ108,长 2 m,环向间距 40 cm,角度 1°~3°	I16,纵向间距 100 cm	Φ25,环向间距 1 m	C25 混凝土,厚 50 cm

2 现场施工监测及分析

2.1 监测内容及方法

在隧道洞口段 YK49+660 处的套拱断面埋设了监测元件,对隧道的套拱支护受力进行监测^[5]。监测项目包括套拱基底应力、混凝土应力、钢架应力及拱顶下沉。监测元件均采用钢弦式传感器,此类元件具有较高的精度和可靠度,且受现场各种干扰小,可长期有效地工作^[6-14]。套拱元件布置如图 3 所示。

2.2 监测结果及分析

2.2.1 套拱基底应力

根据现场埋设的先后顺序,将右侧基底的压力盒编为 1~6 号,左侧基底的压力盒编为 7~12 号,各监测元件的最大应力和最大应力变化范围统计结果见表 2。套拱基底应力时态曲线如图 4 所示,其中 σ 为应力。

从表 2 可以看出:左侧基底应力不均衡,变化范围较大,其值在 0.05~1.19MPa 之间;右侧基底应

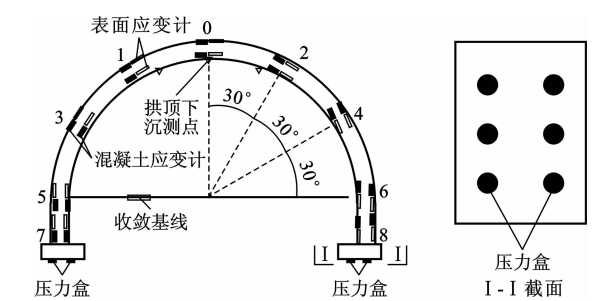


图 3 套拱元件布置

Fig. 3 Arrangement of Umbrella Arch Element

表 2 套拱基底应力统计结果

Tab. 2 Statistical Results of Stresses of

Umbrella Arch Base						MPa
右侧基底			左侧基底			
钢弦式土压力盒编号	最大应力	最大应力范围	钢弦式土压力盒编号	最大应力	最大应力范围	
1	0.48	0.48~0.82	7	0.18	0.05~1.19	
2	0.74		8	1.19		
3	0.68		9	0.13		
4	0.64		10	1.16		
5	0.55		11	0.05		
6	0.82		12	0.45		

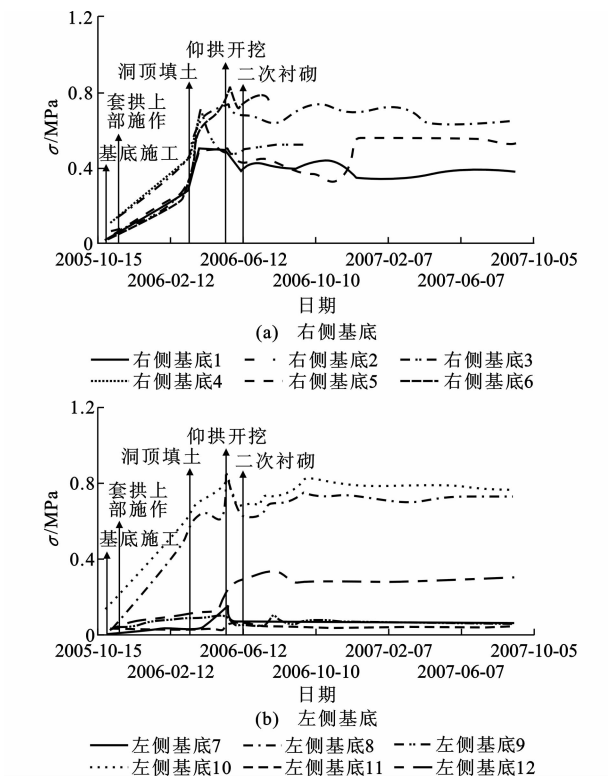


图 4 套拱基底应力时态曲线

Fig. 4 Time Curves of Stresses of Umbrella Arch Base

力较为均衡,其值在 0.48~0.82 MPa 之间,由此可见,左侧基底应力范围大于右侧基底应力范围。

从图 4 可以看出,套拱基底应力在套拱混凝土浇筑初期增长较快,随后在洞口顶部填土时,基底应力急剧增长,到仰拱开挖时达到峰值,在二次衬砌施作后,基底应力趋于平稳。

2.2.2 钢架应力

在钢架的内、外缘均布设表面应变计,以测试钢架内、外两侧的受力情况。钢架内、外侧应力分布如图 5 所示,其中“+”为受压,“-”为受拉,下文同。钢架内、外侧应力时态曲线如图 6 所示。

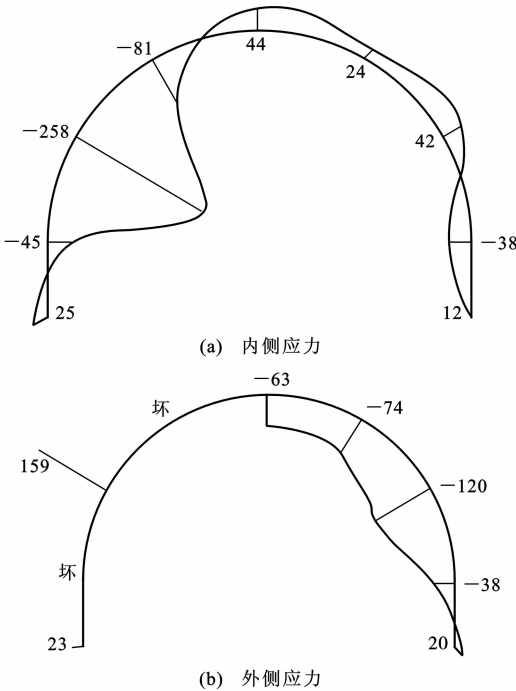


图 5 钢架应力分布(单位:MPa)

Fig. 5 Distributions of Stresses of Steel Frame (Unit: MPa)

从图 5 可以看出,钢架应力分布不均衡。钢架内侧最大拉应力位于左拱腰 60°(角度规定拱顶处为 0°,拱脚处为 90°,下文同)处,其值为-258 MPa,比规范^[15]中规定的钢材屈服强度 235 MPa 要大(钢架采用 Q235 钢材),但比极限强度 375 MPa 要小,说明此点的钢架出现了屈服,但未达到破坏;其次是左拱腰 30°处,其值为-81 MPa;最大压应力位于拱顶处,其值为 44 MPa。钢架外侧最大压应力与内侧最大拉应力位置相对应,位于左拱腰 60°处,其值为 159 MPa,占钢材屈服强度 235 MPa 的 68%;最大拉应力位于右拱腰 60°处,其值为-120 MPa,占钢材屈服强度 235 MPa 的 51%,可见,钢架在套拱支护结构中发挥了强大的支护作用。从图 6 可以看出,钢架施作后,初期应力增长较快,由于套拱处仰拱开挖的扰动,使得钢架应力急剧增大,在二次衬砌施作

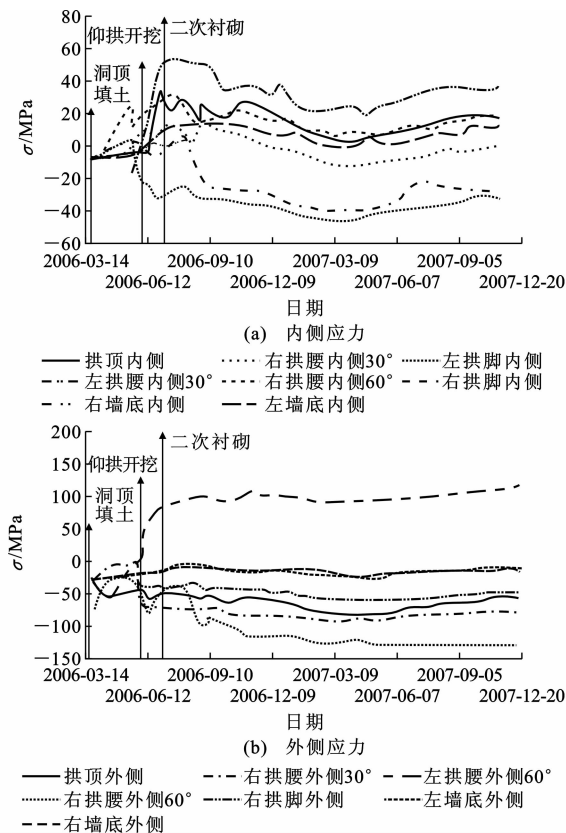


图 6 钢架应力时态曲线

Fig. 6 Time Curves of Stresses of Steel Frame

后应力趋于稳定。

2.2.3 套拱混凝土应力

套拱混凝土应力时态曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,套拱混凝土应力随时间(季节)的变化呈现拉、压交替变化,在夏季出现最大压应力,在冬季出现最大拉应力。究其原因,可能是由于套拱为超静定结构,冬、夏季温差引起混凝土应力发生变化。现场温度测试结果表明,隧道洞口冬、夏季最大温差在 35℃左右。

选取每个测点受到的内、外侧最大压应力和最大拉应力作应力断面分布图,结果如图 8、9 所示。

从图 8、9 可以看出:

(1)套拱混凝土内侧各测点所受的压应力均较小,应力在 1.63~4.16 MPa 之间,小于规范^[16]中规定的 C25 混凝土抗压强度设计值(12.5 MPa),表明结构安全。最大压应力发生在拱顶处,其值为 4.16 MPa,右拱腰 30°次之,其值为 3.02 MPa。套拱混凝土外侧所受的拉应力较大,其值在 -1.68~0 MPa 之间;拱圈左侧所受的拉应力有 3 处都超过了文献^[16]中规定的 C25 混凝土抗拉强度设计值(1.33 MPa)。

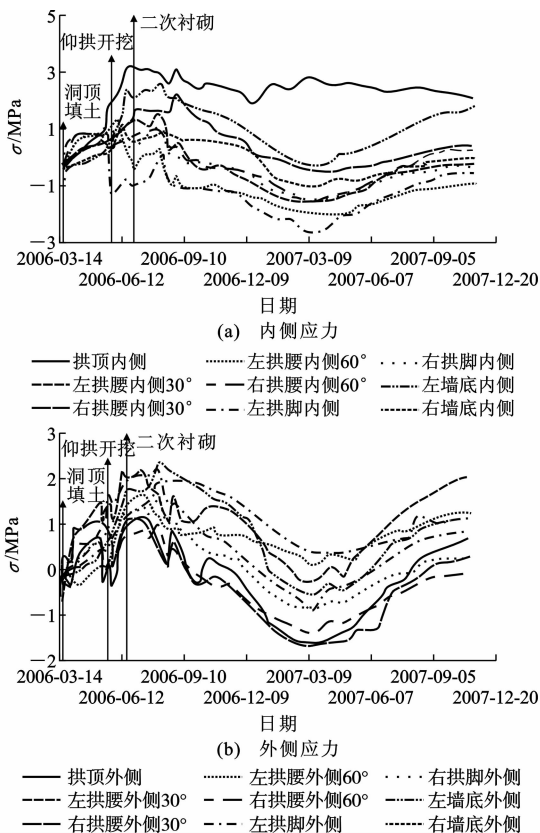


图 7 套拱混凝土应力时态曲线

Fig. 7 Time Curves of Stresses of Concrete in

Umbrella Arch

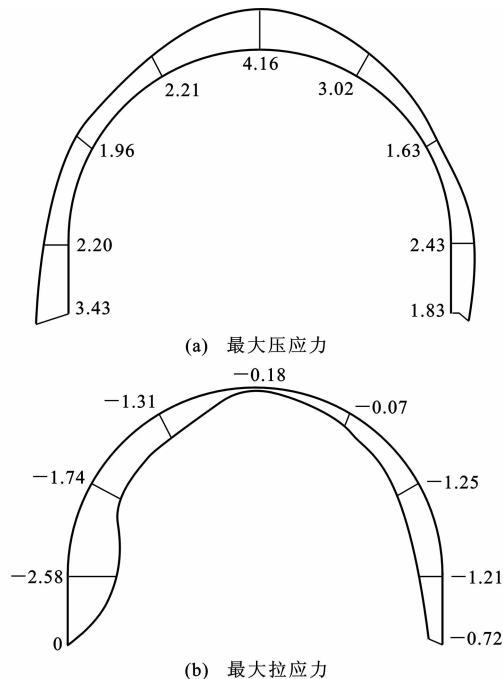


图 8 套拱混凝土内侧最大应力分布(单位:MPa)

Fig. 8 Maximum Stress Distributions of Concrete in

Inner Umbrella Arch (Unit:MPa)

(2)套拱混凝土外侧所受的压应力亦较小,应力

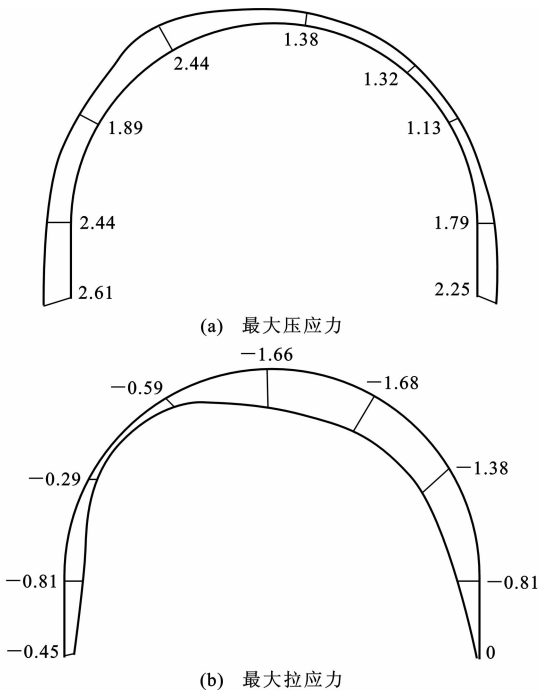


图9 套拱混凝土外侧最大应力分布(单位:MPa)
Fig.9 Maximum Stress Distributions of Concrete in Outer Umbrella Arch (Unit:MPa)

在 1.13~2.61 MPa 之间;最大应力发生在左墙底处,其值为 2.61 MPa;左拱腰 30°和 90°次之,其值均为 2.44 MPa。内侧所受的拉应力较大,其值在 -2.58~0 MPa 之间;外侧拱顶、右拱腰 30°和右拱腰 60°所受的拉应力都超过了文献[16]中规定的 C25 混凝土轴心抗拉强度设计值(1.33 MPa),其值分别为 -1.66、-1.68、-1.38 MPa。

综上所述,套拱混凝土所受的压应力较小,而拉应力较大,多处测点都超过了 C25 模筑混凝土轴心抗拉强度设计值(1.33 MPa),但套拱钢架的受力未超过屈服强度,故结构是安全的。产生这种现象主要是由于冬、夏季较大的温差在超静定结构中引起的温度应力所致,故在冬季需考虑混凝土的防裂问题。

2.2.4 拱顶下沉

在隧道拱顶及左、右拱腰设置拱顶下沉测点,对隧道进行拱顶下沉监测。由监测结果得到的拱顶下沉时态曲线如图 10 所示,其中 u 为位移, v 为速率。

从图 10 可以看出,套拱拱顶下沉的时态曲线可分为 3 个阶段:

(1)第 1 阶段为拱顶下沉急剧增长阶段。随着洞顶填土的施工,拱顶急剧下沉,当洞顶填土结束

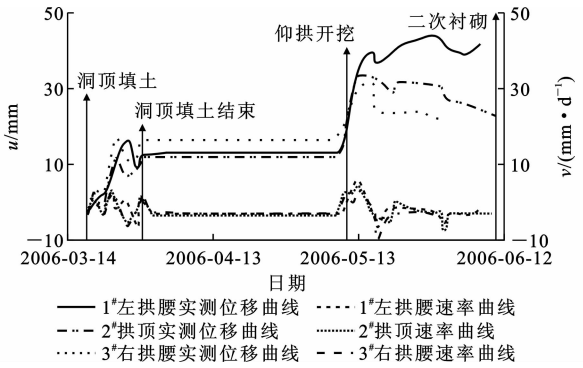


图 10 拱顶下沉时态曲线

Fig.10 Time Curves of Vault Crown Settlement

后,拱顶下沉达到第 1 阶段最大值(18~22 mm)。

(2)第 2 阶段为拱顶下沉暂时稳定阶段。洞顶填土结束后,掌子面的继续开挖对套拱处的拱顶下沉没有影响,套拱地段保持了一个多月的暂时稳定,表明该套拱时间效应不明显。

(3)第 3 阶段为仰拱开挖拱顶下沉再次急剧增长阶段。由于套拱处的仰拱开挖,造成该段空间变化,直接影响到套拱稳定,造成拱顶下沉急剧增长,最大下沉速率达到 26 mm · d⁻¹,由此可见,该段套拱结构的变形特征空间效应大于时间效应,所以套拱结构的稳定性主要取决于空间效应;当仰拱开挖结束后,套拱结构就基本稳定了。

3 结 语

(1)浅埋偏压情况下,套拱两侧基底应力分布不均匀,拱顶填土引起基底应力急剧增长,仰拱施作后基底应力趋于稳定。

(2)套拱钢架受力复杂,有拉有压,且值很大,仰拱开挖引起钢架应力急剧增长。钢架在套拱支护结构中充分发挥了强大的支护作用。

(3)套拱为超静定结构,冬、夏季温差引起套拱混凝土应力随时间(季节)的变化呈现拉、压交替变化,在夏季出现最大压应力,在冬季出现最大拉应力,且压应力较小,拉应力较大,多处测点都超过了 C25 模筑混凝土轴心抗拉强度设计值(1.33 MPa)。

(4)套拱拱顶下沉主要由洞顶填土施工和仰拱开挖引起。

参考文献:

References:

[1] 吴英明. 庆兴黄土隧道出口浅埋段施工技术[J]. 铁道

- 建筑技术,2010(1):25-29.
- WU Ying-ming. Construction Technology in the Shallow-buried Section of Qingxing Loess Tunnel[J]. Railway Construction Technology,2010(1):25-29.
- [2] 袁永新. 甘肃黄土公路隧道设计与施工技术研究[D]. 西安:长安大学,2007.
- YUAN Yong-xin. Sweet Design and Construction Technique of the Gansu Loess Highway Tunnel Research[D]. Xi'an:Chang'an University,2007.
- [3] 李国良. 大跨黄土隧道设计与安全施工对策[J]. 现代隧道技术,2008,45(1):53-62.
- LI Guo-liang. Design and Safety Construction Measures for Large-span Loess Tunnels[J]. Modern Tunneling Technology,2008,45(1):53-62.
- [4] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安:陕西省科学技术出版社,1996.
- LIU Zu-dian. Loess Dynamics and Engineering[M]. Xi'an:Shaanxi Science and Technology Press,1996.
- [5] 陕西省交通建设集团公司吴子建设管理处,长安大学. 黄土隧道支护设计与关键施工技术研究总报告[R]. 西安:长安大学,2010.
- Wubao to Zizhou Construction Management Department of Shaanxi Provincial Communication Construction Group, Chang'an University. Design and Construction Key Technical General Report of Loess Tunnel Lining[R]. Xi'an:Chang'an University,2010.
- [6] 陈建勋,马建秦. 隧道工程试验检测技术[M]. 北京:人民交通出版社,2005.
- CHEN Jian-xun, MA Jian-qin. Tunnel Engineering Test Technology[M]. Beijing:China Communications Press,2005.
- [7] 来弘鹏,谢永利,杨晓华. 黄土公路隧道受力特性测试[J]. 长安大学学报:自然科学版,2005,25(6):53-56.
- LAI Hong-peng, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. Mechanical Characteristic of Highway Tunnel in Loess[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2005,25(6):53-56.
- [8] 韩桂武,刘 斌,范 鹤. 浅埋黄土隧道衬砌结构受力分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(1):3250-3256.
- HAN Gui-wu, LIU Bin, FAN He. Mechanical Characteristics of Tunnel Lining Structure in Shallow-buried Loess Area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(1):3250-3256.
- [9] 陈建勋,王 超,罗彦斌,等. 高含水量土质隧道不设系统锚杆的试验研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(5):815-820.
- CHEN Jian-xun, WANG Chao, LUO Yan-bin, et al. Experimental Research on High-water-content Soil Tunnel Without Systematic Bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(5):815-820.
- [10] 陈建勋,姜久纯,王梦恕. 黄土隧道网喷支护结构中锚杆的作用[J]. 中国公路学报,2007,20(3):71-75.
- CHEN Jian-xun, JIANG Jiu-chun, WANG Meng-shu. Function of Rock Bolt of Lattice Girder and Shotcrete Support Structure in Loess Tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(3):71-75.
- [11] 谭忠盛,喻 渝,王明年,等. 大断面浅埋黄土隧道锚杆作用效果的试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(2):491-495,506.
- TAN Zhong-sheng, YU Yu, WANG Ming-nian, et al. Experimental Study on Bolt Effect on Large Section Shallow Depth Loess Tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(2):491-495,506.
- [12] 陈建勋,姜久纯,罗彦斌,等. 黄土隧道洞口段支护结构的力学特性分析[J]. 中国公路学报,2008,21(5):75-80.
- CHEN Jian-xun, JIANG Jiu-chun, LUO Yan-bin, et al. Mechanics Characteristic Analysis of Support Structure of Loess Tunnel Entrance[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(5):75-80.
- [13] 陈建勋,杨 忠. 秦岭终南山特长公路隧道东线施工监控量测[J]. 公路,2006(7):205-208.
- CHEN Jian-xun, YANG Zhong. Construction Monitoring in East Line in Qinling Zhongnanshan Super-long Highway Tunnel[J]. Highway,2006(7):205-208.
- [14] 陈建勋,杨 忠,袁雪戡. 秦岭终南山特长公路隧道大埋深段施工监测及分析[J]. 建筑科学与工程学报,2006,23(3):71-75.
- CHEN Jian-xun, YANG Zhong, YUAN Xue-kan. Construction Monitoring and Measuring in Segments of Large Embedded Depth in Qinling Zhongnanshan Super-long Highway Tunnel[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2006,23(3):71-75.
- [15] JGJ 138—2001,型钢混凝土组合结构技术规程[S].
- JGJ 138—2001, Technical Specification for Steel Reinforced Concrete Composite Structures[S].
- [16] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].
- JTG D70—2004, Code for Design of Highway Tunnel [S].