

# 公路隧道 V 级围岩初支型钢支架受力分布及动态变化研究\*

江玉生<sup>①</sup> 江 华<sup>①②</sup> 王金学<sup>③</sup> 姜立辉<sup>④</sup> 董志伟<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院 北京 100083)

(<sup>②</sup>深部岩土力学与地下工程国家重点实验室 北京 100083)

(<sup>③</sup>承德市公路工程管理处 承德 067020)

(<sup>④</sup>河北省承德承秦高速公路管理处 承德 067020)

**摘 要** 随着隧道施工地层条件的复杂化,型钢支架与锚喷网联合支护体系已被广泛应用于围岩较差的隧道初期支护。型钢支架是初支的主要受力结构,其受力分布及其动态变化是支护体系稳定的关键控制因素之一,隧道顶部、拱腰及仰拱连接处型钢支架受力变化能有效地反应围岩压力的变化情况。针对 V 级围岩隧道开挖后复杂的应力状况,采用围岩变形控制理论作为隧道施工的安全控制标准。通过对河北省道京承线滦平过境路棒槌沟隧道初支型钢支架受力的监测与分析,基于大量监测数据对监测断面型钢支架受力分布动态变化状况展开研究。结果表明:(1)隧道偏压现象严重,应根据受力分布规律,及时优化支护参数;(2)隧道掌子面与监测断面距离为 0~4m 时,型钢支架压力增加显著,是隧道施工中加强支架控制的关键时段;(3)型钢支架连接处及拱脚位置受力较大,设计时应合理调整各段型钢支架的长度及连接位置,确保连接处的刚度。研究结果对指导施工及反馈隧道设计具有重要理论与实际意义,也为类似研究提供参考。

**关键词** 公路隧道 V 级围岩 型钢支架 受力分布 动态变化

中图分类号:U451+.2 文献标识码:A

## PRESSURE DISTRIBUTION AND ITS VARYING CHARACTERISTICS OF STEEL RIB SUPPORT IN GRADE V SURROUNDING ROCK OF ROAD TUNNEL

JIANG Yusheng<sup>①</sup> JIANG Hua<sup>①②</sup> WANG Jinxue<sup>③</sup> JIANG Lihui<sup>④</sup> DONG Zhiwei<sup>③</sup>

(<sup>①</sup>School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083)

(<sup>②</sup>State Key Laboratory for GeoMechanics and Deep Underground Engineering, Beijing 100083)

(<sup>③</sup>Chengde Road Construction Administration Office, Chengde 067020)

(<sup>④</sup>Cheng-Qin Highway Administration Department, Hebei Province 067020)

**Abstract** More complicated geological conditions can be encountered in tunnel construction. Flexible support system composing of anchors, sprayed concrete and steel ribs is widely employed in road tunnels with poor surrounding rock conditions such as the grade V surrounding rock. The steel rib is the skeleton and the main bearing structure of the flexible support system. Its pressure distribution state is one of the key factors for controlling the stability of temporary support system in advance. The pressure varying characteristics between the joint areas of steel ribs and sur-

\* 收稿日期:2011-10-20;收到修改稿日期:2012-02-25.

第一作者简介:江玉生,主要从事隧道及城市地下工程方面的研究工作. Email:yusheng.jiang@263.net

rounding rock can greatly reflect the surrounding rock state. These areas are the crown, the jointed points and the feet of steel ribs. According to the varying characteristics of such complicated pressure states in the grade V surrounding rock after excavation of road tunnel, safety control standards of tunnel construction process are adopted as the key factor of surrounding rock deformation. The pressure sensors are used for monitoring its variation on steel ribs in the Bangchuigou road tunnel. With a large number of monitoring data analysis, the following pre-conclusions can be obtained: (1) Pressure on the steel ribs is not symmetric. The parameters of temporary support system should be optimized in time according to the surrounding rock pressure distribution. (2) Within four meters between tunnel face and monitoring section, the pressure on steel rib at arch centering increases significantly. The stiffness of the jointed steel rib as a whole should be properly kept in high state. (3) the pressure on steel rib at the joints and feet of steel ribs also greatly changes, where the weakness parts of steel rib support system are. So the stiffness and stability should be fully considered at design stage for assuring the safety of tunnel construction. These results not only are of theoretical and constructional importance for tunnel projects, but also can help us improve our tunnel design for other similar studies.

**Key words** Road tunnel, Grade V surrounding rock, Steel ribs, Pressure distribution, Flexible support system

## 1 引言

近年来,随着我国基础设施建设的大规模展开,隧道工程施工技术在我国得到了长足的进步,自20世纪70年代新奥法施工技术被引入我国以来,其先进的思想已经逐渐得到我国隧道工程界的肯定<sup>[1-4]</sup>,基于这种思想,运用锚喷技术的隧道柔性支护在隧道开挖施工中得到了广泛的运用。现场监控量测作为新奥法施工的重要组成部分,对指导施工及反馈设计起着极其重要的作用。围岩应力是隧道开挖后隧道结构重要的反馈信息之一,通过监测围岩应力的变化情况,可以及时了解岩体结构及支护体系的稳定状况,因此围岩应力计算和监测在岩土工程中具有重要意义,国内外专家及学者对其进行了大量的研究<sup>[5-10]</sup>。由于公路隧道呈现大跨扁平的特点,因此在强度较低、稳定性较差的V级围岩中,初期支护主要采用型钢支架加锚喷网的支护体系,该支护体系与隧道围岩构成一个统一的整体,共同维持隧道结构在隧道开挖阶段初期的安全与稳定,确保隧道施工作业的正常进行。该支护体系中,型钢支架是支护体系的骨架,是隧道开挖后围岩变形初支体系的主要受力结构之一,其背部及连接处受力的变化能有效地反应围岩应力的变化情况,施工过程中及时掌握型钢支架各个部位受力分布及其动态变化情况对控制围岩变形,保持隧道支护结构的稳定至关重要<sup>[11-13]</sup>。目前,对型钢支架受力的监控量测分析基本限于强度、变形的极限分析,结合现场初支裂缝的目测,通常发现型钢支架出现危险时

已经到事故发生之时,甚至是事故发生以后。对型钢支架支撑体系的设计实际运用效果及施工安全性预测没有系统研究和可靠方法,不能预先进行安全性判别。

本文从实际隧道工程出发,针对隧道进口段某一断面特殊的地质概况,在型钢支架顶部、拱脚及拱架连接处布置压力盒进行压力监测,通过分析型钢支架不同位置受力分布及动态变化规律,探讨如何运用型钢支架受力监测结果分析初支设计的合理性,为施工中钢拱架材料的选择、支护时间的控制提供参考,同时对将来类似地层初期支护方式的选择、支护参数的优化提供借鉴,具有重要的理论与实际意义。

## 2 监测断面工程概况

河北省道京承线滦平过境路棒槌沟隧道位于河北省滦平县境内,采用上下台阶法开挖,监测断面里程K5+095.2,距离隧道进口约22m,属于隧道上台阶,围岩主要为蓝灰色、灰绿色泥岩,含砂质泥岩,岩石风化严重,强度较低,约为5~20MPa,属软质岩(图1)。

监测断面掌子面围岩整体呈裂隙层状结构,层理间距较小,夹杂黄色蚀变物,稍经振动易发生掉块现象,对隧道的稳定极为不利,监测断面处隧道埋深约为15m,处于浅埋段。根据《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)综合判定该监测断面围岩为V级,初期支护采用型钢支架+挂网+锚喷的支护体系,拱架全长26.8m,由3段工字钢连接而成。现场

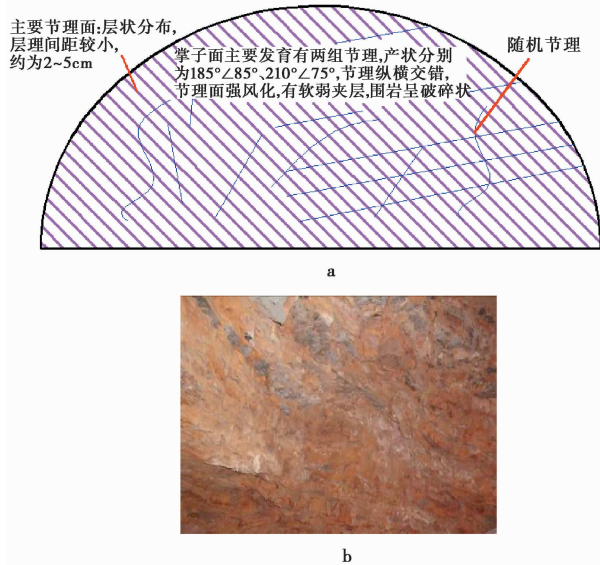


图1 监测断面地质素描及现场照片

Fig. 1 Geological face mapping and photo of monitoring section  
a. 监测断面地质素描图; b. 监测断面现场照片

采用S5a浅埋复合衬砌,设计及实际支护参数如下:  
(1)  $\Phi 25 \times 5$ mm 中空砂浆锚杆:设计环距100cm,纵距50cm;  
(2) C30喷射混凝土:设计厚度26cm;  
(3)  $\Phi 8$  双层钢筋网:设计间距 $20 \times 20$ cm;  
(4) 20a工字钢拱架:设计纵距50cm。

### 3 监测方案

#### 3.1 压力盒量测与计算原理

本次监测采用丹东前阳工程测试仪器厂生产的XYJ-5型钢弦式双模压力盒,最大量程5MPa,直径110mm,厚度37mm。压力盒钢弦式传感器中有一根张紧的钢弦,当传感器受围岩压力作用时,弦的内应力发生变化,随着弦的内应力改变,自振频率也发生变化,弦的张力越大,自振频率越高,反之,自振频率越低。因此利用钢弦张力变化引起自振频率变化的原理,可测得压力盒薄膜所受应力为:

$$P = k(f^2 - f_0^2) \quad (1)$$

式中, $f$ 为压力盒受压后钢弦的频率(Hz); $f_0$ 为压力盒未受压时钢弦的初频(Hz); $P$ 为压力盒薄膜所受的应力(MPa); $k$ 为压力盒标定系数。

由公式(1)所得的压力盒应力 $P$ ,可计算出压力盒所受的围岩压力 $F$ ,即:

$$F = P \cdot A \quad (2)$$

式中, $F$ 为压力盒所受压力值; $A$ 为压力盒面积( $m^2$ )。

#### 3.2 测点布置

整个监测断面共布置25个压力盒,其中型钢支架背部21个,两侧邻接段与拱顶段连接处各1个;拱脚两侧分别布置1个。拱顶段背部压力盒间距0.8m;两侧邻接段背部压力盒间距为1.0m;拱架两侧压力盒对称布置,压力盒测线分别引入置于隧道上导坑两侧的焊接铁盒内,铁盒位于上导坑起拱线以上0.5m处(图2)。

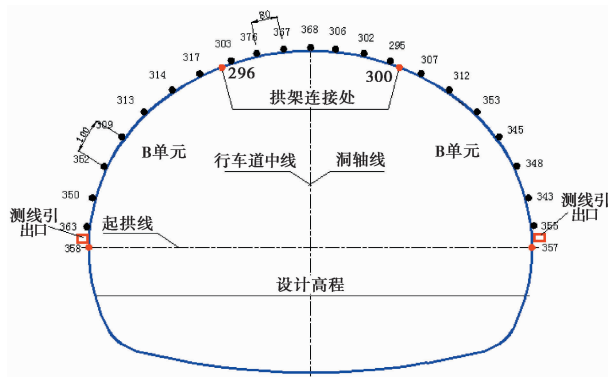


图2 监测断面压力盒布置图

Fig. 2 Arrangement of pressure cells on monitoring section along steel rib

#### 3.3 压力盒安装

压力盒的安装遵循两个基本原则:首先,尽量保护压力盒在施工过程中(型钢支架、超前锚杆、小导管及喷射混凝土工序施工)不被损坏,确保监测数据有效;其次,压力盒作用面受力均匀,数据真实可靠。安装过程包括以下几部分:

(1) 压力盒上下固定垫板的加工。根据压力盒的尺寸加工上下2块固定垫板,厚度为5mm,其中底部垫板需焊接3个(或4个)挡桩,防止在搬运过程中压力盒从上下两块垫板间脱落。

(2) 压力盒在工字钢上的固定。首先,将带挡桩的下部垫板焊接在相应的压力盒安装设计位置。其次,将相应编号的压力盒放置在已经焊接好的下部垫板上。最后,将上部垫板置于压力盒上,并用螺栓固定压力盒(图3、图4)。

(3) 相邻压力盒连接传力钢板的焊接。在2相邻压力盒之间焊接连接传力钢板,保证拱架外缘的围岩压力均传递到压力盒上。采用柔软物品(如废弃的水泥袋等)将压力盒传力钢板与工字钢背部之间的空隙填塞,防止喷射混凝土进入该空隙(图4)。

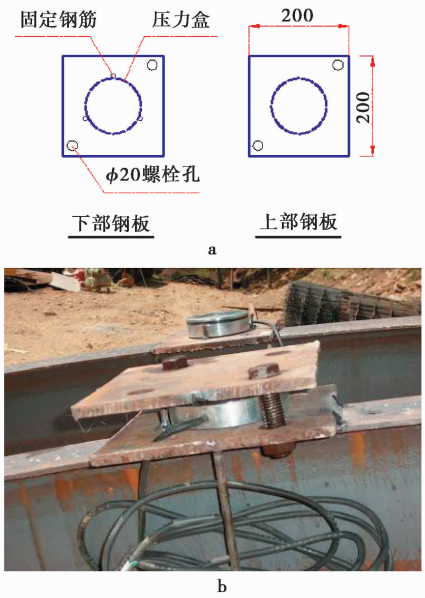


图3 压力盒安装设计图

Fig. 3 Installation details of pressure cell

a. 压力盒固定设计图; b. 压力盒安装后照片

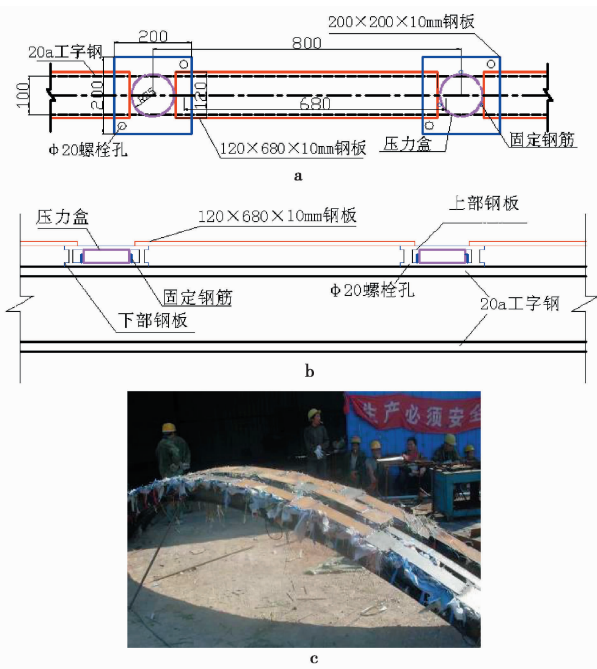


图4 压力盒及监测拱架安装设计图

Fig. 4 Installation of pressure cells along monitoring steel rib

a. 压力盒安装及固定平面图; b. 压力盒安装及固定侧面图;  
c. 监测拱架安装完成后照片

(4) 洞内安装。压力盒随钢拱架立于监测断面,将钢拱架左右两侧压力盒导线引入对应的监测铁盒中。

## 4 监测结果分析

### 4.1 型钢支架背部压力分析

现场对监测断面进行了为期 2 个月的持续监测,整理后的监测数据显示,监测断面围岩压力分布不均匀,隧道存在比较严重的偏压,右侧围岩压力明显大于左侧。型钢支架背部压力最大位于拱腰 312 号测点处,最大压力约 0.25MPa。型钢支架背部所受围岩压力情况主要分为 3 个阶段:急剧增加阶段、逐渐降低阶段及基本稳定阶段。

(1) 压力急剧增加阶段:主要发生在隧道开挖 3 天内,掌子面从开挖至距离监测断面约 4.0m,型钢支架背部各个位置受到的围岩压力急剧增加。初次支护和围岩相互作用,受工作面爆破及空间效应的影响。此阶段围岩与型钢支架背面的压力盒是接触到逐步施加压力的过程,由于喷射混凝土的强度还没有达到最大,因此,随着围岩应力的释放,施加在型钢支架背部压力盒上受到的压力不断增大。

(2) 压力逐渐降低阶段:随着喷射混凝土的强度不断提高和支架变形的逐步调整,锚杆等支护体系支撑作用的发挥,围护与支护相互作用趋于稳定,围岩自承能力逐步发挥,支护适度让压后,围岩变形得到控制,围岩传递给型钢支架的压力逐渐减小,当监测断面距离掌子面约 11m 时,支架背部压力最小。

(3) 基本稳定阶段:当监测断面与掌子面之间的距离大于 1.5 倍的开挖直径后,围岩的支承能力得到充分发挥,喷混强度达到最大,空间效应降低到最小,围岩应力后重分布趋于新的平衡。

图 5、图 6 和图 7 分别给出了上述钢架受力变化过程。

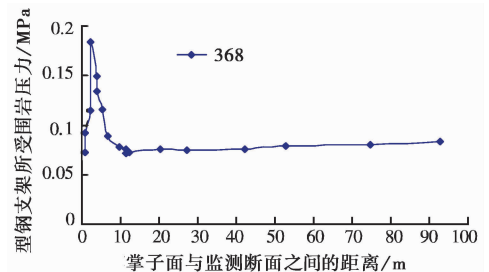


图5 拱顶位置型钢支架所受压力变化曲线

Fig. 5 Curve of pressure in vault of steel ribs

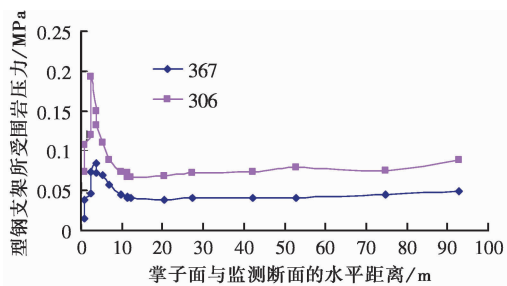


图6 拱顶两侧型钢支架所受压力变化曲线

Fig. 6 Curve of pressure of steel ribs in left and right sides of vault

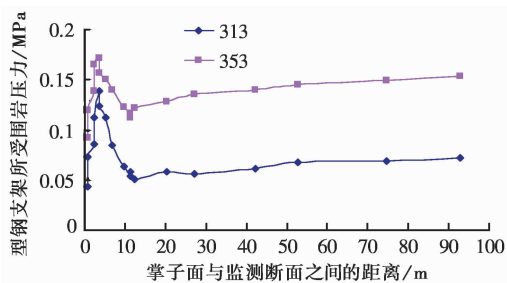


图7 拱腰两侧拱架压力变化曲线

Fig. 7 Curve of pressure in haunch of steel ribs

#### 4.2 型钢支架连接处压力分析

型钢支架连接处位于拱顶左右两侧,成对称分布。由于隧道偏压的存在,右侧断面连接处的压力大于左侧,两个测点压力变化分为2个阶段(图8):第1阶段,掌子面与监测断面距离为0~4.0m时,型钢支架连接处压力急剧增加,当掌子面与监测断面距离大于4.0m后,压力缓慢增加至逐渐趋于稳定。

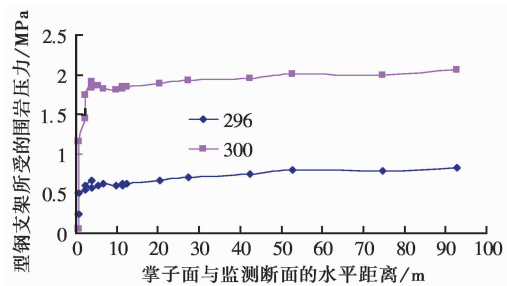


图8 型钢支架连接处压力变化曲线

Fig. 8 Curve of pressure in joint of steel ribs

#### 4.3 型钢支架拱脚处压力分析

如图9所示,拱脚两侧压力变化规律与型钢支架连接处的压力分别规律类似,掌子面与监测断面距离0~4.0m时,压力呈线性增加,增加速率较快,

然后随着监测断面距离掌子面的长度不断增大,初支支护强度达到设计最大强度后,与围岩一起承受压力,空间效应的影响较低,型钢支架受到的压力逐渐趋于稳定。

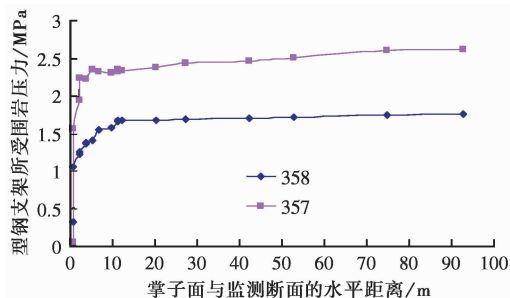


图9 型钢支架拱脚压力变化曲线

Fig. 9 Curve of pressure of steel ribs in arch foot

## 5 结论

(1)河北省道京承线滦平过境路棒槌沟隧道呈典型偏压状态,右侧围岩压力明显大于左侧。后期隧道施工中应密切注意围岩应力分布规律,适时调整支护结构,增加整个支护体系的强度、刚度及稳定性,确保施工安全。

(2)隧道开挖后,围岩应力逐步释放,掌子面与监测断面距离在0~4.0m范围内时,作用在型钢支架上的围岩压力急剧增加,此时,由于喷射混凝土的强度尚未达到设计最大值,联合支护体系尚未完全形成,围岩压力主要由型钢支架承受,施工中应根据压力变化情况,确保型钢支护薄弱环节的有效性和隧道安全。

(3)型钢支架连接处及拱脚位置所受压力较大,应根据围岩压力分布情况,设计时给出合适的支架段长及其连接位置,并确保连接位置的刚度。同时及时施作仰拱形成封闭支护,也是十分重要的。

## 参考文献

- [1] 沈才华,童立元.大跨公路隧道初支钢拱架稳定性预测判别方法研究[J].施工技术,2006,35(增刊):148~151.  
Shen Caihua, Tong Liyuan. Discussion on forecasting the stability of steel arch frame with large-span road-tunnel. Construction Technology, 2006, 35(S): 148~151.
- [2] 刘波,伍鹤皋,苏凯,等.导流隧洞钢拱架与锚喷支护体系有限元分析[J].武汉大学学报,2009,41(1):29~31.  
Li Bo, Wu Hegao, Su Kai, et al. Finite element analysis of combined support system of steel arch shelf and lock bolting with shotcrete in diversion tunnel. Engineering Journal of Wuhan University, 2009, 41(1): 29~31.



- ty, 2009, **41**(1): 29 ~ 31.
- [3] 安其美, 郭启良, 赵仕广, 等. 地下洞室围岩应力测量研究[J]. 岩土力学, 1996, **16**(1): 48 ~ 53.  
An Qimei, Guo Qiliang, Zhao Shiguang, et al. The research and measurements of the stress in surrounding rock of underground tunnel. Rock and Soil mechanics, 1996, **16**(1): 48 ~ 53.
- [4] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.  
Wang Mengshu. Tunnelling and Underground Engineering Technology in China. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [5] 刘春. 深埋大断面隧道施工力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学博士学位论文, 2007.  
Liu Chun. Study on Constructional Mechanical Responses of Highway Tunnel with Deeply-lying and Large Cross Section. Chongqing: Chongqing University, 2007.
- [6] 李攀峰. 大型地下洞室围岩稳定性工程地质研究——以黄河拉西瓦水电站地下厂房洞室群为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2004.  
Li Penfeng. Engineering Geology Study on the Stability of Rock Mass Surrounding Large Scale Underground Caverns—Taking the Underground Caverns of Laxiwa Hydroelectric Power Station on Yellow River as an Example. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2004.
- [7] 曲海峰, 朱合华, 黄成造, 等. 隧道初期支护的钢拱架与钢格栅选择研究[J]. 地下空间与工程学报, 2007, **3**(2): 58 ~ 62.  
Qu Haifeng, Zhu Hehua, Huang Chengzao, et al. Study on selection of section-steel and grid-steel in primary support system of tunnel. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2007, **3**(2): 58 ~ 62.
- [8] 余永强, 熊芳斌, 李华茂. 厦门翔安海底隧道开挖围岩应力与位移监测分析[J]. 施工技术, 2010, **39**(1): 36 ~ 37.  
Yu Yongqiang, Xiong Fangbin, Li Huamao. Monitoring analysis of surrounding rock stress and displacement in Xiamen Xiang'an seabed tunnel excavation. Construction Technology, 2010, **39**(1): 36 ~ 37.
- [9] 赵旭峰, 王春苗. 厦门海底隧道围岩稳定动态反演分析[J]. 工程地质学报, 2007, **15**(2): 228 ~ 232.  
Zhao Xufeng, Wang Chunmiao. Dynamic displacement back ~ analysis on stability of surrounding rocks along Xiamen sub-sea tunnel. Journal of Engineering Geology, 2007, **15**(2): 228 ~ 232.
- [10] 刘军强. 西周岭隧道地应力测量及岩爆预测分析[J]. 工程地质学报, 2011, **19**(3): 428 ~ 432.  
Liu Junqiang. In-situ stress measurement and rockburst analysis in Xizhouling tunnel. Journal of Engineering Geology, 2011, **19**(3): 428 ~ 432.
- [11] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范(JTG D70 ~ 2004)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
Chongqing Communications Research & Design Institute. Code for Design of Road Tunnel (Jtg D70 ~ 2004) Beijing, China Communications Press, 2004.
- [12] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
Guang Baoshu. Collection of Design Outline on Tunnel. Beijing: China Communications Press, 2003.
- [13] 蒋树屏, 胡学兵. 云南扁平状大断面公路隧道施工力学响应数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 178 ~ 182.  
Jiang Shuping, Hu Xuebing. Numerical analysis of constructional mechanical responses of Yangzong tunnel. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 178 ~ 182.