

# 岩溶隧道衬砌水压力分布规律研究

谭忠盛<sup>1</sup>, 李健<sup>1</sup>, 薛斌<sup>2</sup>, 王秀英<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 铁道部宜万铁路建设指挥部, 湖北恩施 445000)

[摘要] 长期以来隧道衬砌水压力问题,一直是人们争论的焦点。依托宜万铁路岩溶隧道工程,对不同防排水方式(即全封堵、堵排结合及排放方式)的隧道衬砌水压力分布规律进行研究,研究方法主要采用模型试验及现场测试方法,模型试验的比例尺为1:16,试验台架可同时施加土压和水压。通过模型试验得出水压力分布规律:全封堵条件下衬砌背后水压力不能折减,注浆圈也不能有效减小水压力;隧道内排水后衬砌背后水压力明显减小,并随着排水量的增加,水压力基本成直线下降;相同排水量时,注浆效果越好,衬砌背后水压力减小越明显;隧道采用全排导方式时,衬砌仍承受一定的水压。由模型试验得出的水压分布规律的部分结论,在现场水压力测试中得到了验证。

[关键词] 岩溶隧道;全封堵;限量排放;水压力;模型试验

[中图分类号] U455.91 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)12-0087-06

## 1 前言

在高水压富水的岩溶区修建隧道,确定隧道合理的防排水方式及衬砌背后水压力,是隧道结构设计的关键技术之一,关于衬砌水压力折减问题,一直是人们关注和争论的焦点。

长期以来,铁路及公路隧道的防排水设计一直采用“防、排结合,以排为主”的设计原则,在衬砌结构计算中不考虑水压力作用。大量工程经验表明,长期大量的排水不仅破坏地表环境,而且使得衬砌背后围岩裂隙被冲刷形成空洞,对隧道结构承载不利。目前,铁路及公路隧道的设计规范采取“以堵为主、限量排放”的设计原则,衬砌考虑承受一定的水压作用,但是确定衬砌水压力却十分困难。

对于衬砌水压力是否折减以及如何折减等问题,各国都没有系统研究成果,仅有几种估算方法,概括起来有3种方法:a. 折减系数法,综合各国实际工程采用的折减系数 $\beta$ 在0.15~0.9之间变化,澳大利亚、美国、日本有时采用此法;b. 全水头法,

取 $\beta=1$ ,德国、日本常用,美国有时也采用此法;c. 可能最大水头值法,认为最高可能地下水水位在地面,按这一水位的静水头作为隧洞衬砌设计外水压力,巴西、加拿大常采用此法。前苏联的公路隧道规范也将外水压力作为设计的永久荷载,并规定设计时地层压力选取应依据在相似的环境下、相似的施工经验所获取的数值。我国水工隧洞设计规范在设计时考虑了衬砌外水压力,引入一个折减系数 $\beta$ 来计算不同情况下的水压力大小,但 $\beta$ 的取值仅考虑了围岩与衬砌的相对渗透系数,而且在取值时靠定性判断为主,缺乏定量的标准,其确定带有很大的主观性。实际上,作用在衬砌上的水压力与围岩级别、初始渗流场、衬砌条件、防排水措施以及初始地应力场等均密切相关。

对于岩溶隧道,由于岩溶本身的复杂性,要确定衬砌水压力就更加困难了,水压力不仅与地下水水位及防排水方式有关,还与岩溶形态、特性、填充物、连通性等有关。文章以宜万铁路岩溶隧道为依托,采用模型试验及现场测试方法研究衬砌水压力的分布

[收稿日期] 2009-10-30

[基金项目] 铁道部计划项目(2004G033);国家自然科学基金资助项目(50878019)

[作者简介] 谭忠盛(1963-),男,广西蒙山县人,博士,北京交通大学教授,博士生导师,主要从事隧道及地下工程方面的研究工作;

E-mail: zstan@vip.sina.com

规律,模型试验主要模拟隧道穿越大型填充岩溶时不同防排水方式下衬砌背后水压及注浆圈外渗透压的大小及分布规律,并给出几个典型岩溶隧道衬砌水压力的现场试验实测结果。

## 2 衬砌水压力计算理论

### 2.1 水压力计算的折减系数法

根据水工隧道设计规范规定:对于山岭隧道深层构造裂隙水,作用在衬砌上水压力为:

$$p = \beta\gamma H \quad (1)$$

式(1)中, $p$  为原始水压力值; $\beta$  为外水压力折减系数; $\gamma$  为水的容重; $H$  为作用水头,按地下水位线与隧洞中心线之间的高差确定。

对于深埋岩溶隧道水压力,有关学者<sup>[1~5]</sup>认为按表1确定折减系数。

表1 根据岩溶程度折减系数  $\beta$  值  
Table 1 Values of deducting coefficient  $\beta$  of water pressure according to Karst degree

岩溶强度	岩溶类型	透水性	$\beta$ 值
微弱	溶孔型	微弱透 ( $k < 0.01$ )	$< 0.1$
弱	溶隙型	弱透水 ( $k = 0.01 \sim 1$ )	$0.1 \sim 0.3$
中等	隙洞 - 洞隙型	透水 ( $k = 1 \sim 10$ )	$0.3 \sim 0.5$
强	管道 - 强洞隙型	强透水 ( $k > 10$ )	$0.5 \sim 1.0$

注:表中  $k$  为渗透系数,单位:m/d

隧洞开挖后达到允许渗透量时,文献[6]认为按式(2)确定水压力:

$$p_1 = \beta\gamma h \left[ 1 - \sqrt{q'/q_s} \right] \quad (2)$$

式(2)中, $p_1$  为隧道开挖后达到允许渗透量时的水压力值; $q'$  为衬砌常年允许渗透量; $q_s$  为隧道正常涌水量。

岩溶隧道采用限量排放后形成止水圈,注浆后水压力按式(3)计算:

$$p_2 = \beta\gamma h \left[ 1 - \sqrt{q''/q_s} \right] \sqrt{q''/q_s} \quad (3)$$

式(3)中, $p_2$  为隧道经注浆后达到允许渗透量时的衬砌水压力值; $q''$  为注浆后的隧道涌水量。

根据宜万铁路岩溶隧道水压现场测试结果,发现水压折减系数变化非常大,岩溶水压力最小折减系数为0.02,最大折减系数为0.86,而且与式(2)所要求的折减系数相差较大,这其中的原因可能是隧道岩溶水运动规律不符合达西定律,岩溶水主要是管道流,而不是渗流。

### 2.2 岩溶隧道水压力计算方法

圆梁山隧道 DK354 + 460 充填粉细砂层溶洞与地表的的关系示意图如图1所示,在隧道标高以上约

273 m 的位置有排泄面,在隧道标高以下没有找到排泄面。经测定溶洞内水压力为 2.73 MPa,水压力值与排泄面和隧道间的高程差 273 m 相吻合。又如齐岳山隧道出口 PDK366 + 267 突水点(见图2),该处地表标高为 1 400 m,隧道标高 1 040 m,与地面标高高差 360 m。勘测期间,未发现大型排泄基准面,该处实测水压为 3.2 MPa,与隧道埋深比较接近<sup>[7,8]</sup>。

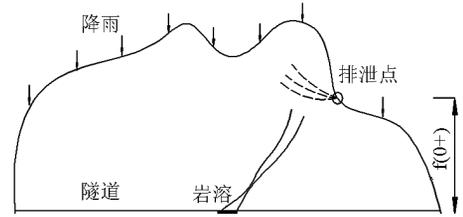


图1 圆梁山隧道溶洞与地表关系

Fig. 1 The location between solution cavity and surface of Yunliangshan Tunnel

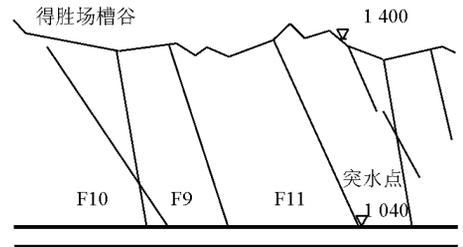


图2 齐岳山隧道突水点与地表关系(单位:m)

Fig. 2 The location between water burst and surface of Qiyueshan Tunnel (unit: m)

从以上分析可知,岩溶隧道水压力大小主要与隧道标高上下是否有排泄面有关。因此可以建立岩溶隧道原始水压力计算模式及计算公式<sup>[9,10]</sup>。

$$p = f(m_{\uparrow}, m_{\downarrow}) \quad (4)$$

式(4)中: $m_{\uparrow}$ ,  $m_{\downarrow}$  分别为隧道标高上、下与隧道存在联系的临近强排泄基准面。

同时,岩溶隧道原始水压力值也与排泄面排泄能力,以及地表降雨补给能力有关,因此,水压力值可表示为:

$$p = f(Q_{\#}^+, Q_{\#}^-, Q_{\#}^{\text{补}}) \quad (5)$$

式(5)中: $Q_{\#}^+$ ,  $Q_{\#}^-$  分别为隧道标高上、下与隧道存在联系的临近强排泄面排泄能力; $Q_{\#}^{\text{补}}$  为地表降雨补给能力。

## 3 衬砌水压力的模型试验

### 3.1 模型试验方案

采用北京交通大学自主研发的可同时加载水压

力和围岩压力的隧道模型试验装置进行试验,该系统主要由液压系统、水压系统、机械系统、控制系统和数据采集系统组成,如图3所示。

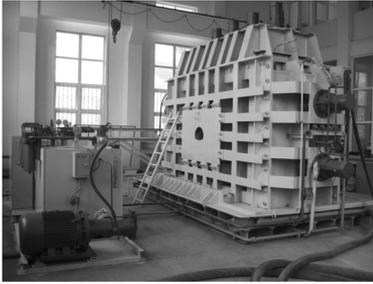


图3 隧道结构与围岩相互作用模拟试验系统

Fig. 3 Double-field coupling test rig for tunnel structure

模型试验主要研究隧道穿越高压水充填岩溶时衬砌水压力分布规律,隧道采用抗水压衬砌,模型试验的几何比尺  $\alpha_r = 16$ ,其他相似常数为:容重  $\alpha_\gamma = 1$ ,泊松比  $\alpha_\mu = 1$ ,弹性模量  $\alpha_E = \alpha_r$ ,  $\alpha_r = 16$ ,围岩渗透系数  $\alpha_k = 1$ 。根据相似常数,围岩的模型材料采用砂性黏土,注浆材料采用水泥+水玻璃,隧道衬砌的模型材料采用钢筋混凝土,衬砌外包防水板和无纺布,防水层背后设置纵向盲管与环向盲管,并在衬砌墙脚两侧设置排水口。

试验过程主要测试项目:衬砌背后水压力、注浆圈外渗透压、衬砌结构内外侧应变,测点布置如图4所示。应变采用光纤光栅传感测量系统,水压采用U型水银压力计测量,如图5和图6所示。

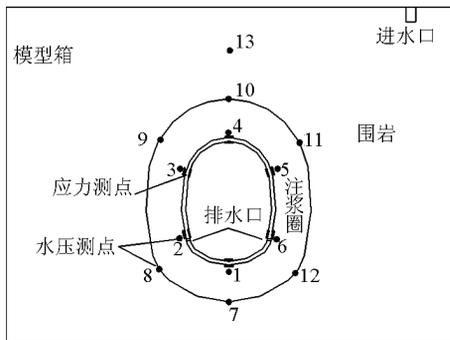


图4 水压及应力测点布置图

Fig. 4 Layout of water pressure monitoring point

试验过程:a. 制作隧道结构模型;b. 安装光纤光栅应变传感器;c. 安装模型外防排水系统;d. 在台架内安装隧道模型、回填岩土体及埋设水压测试点;e. 施加土压力至稳定状态;f. 施加水压至稳定状态;g. 测试衬砌背后水压力、注浆圈外渗透压及结构应

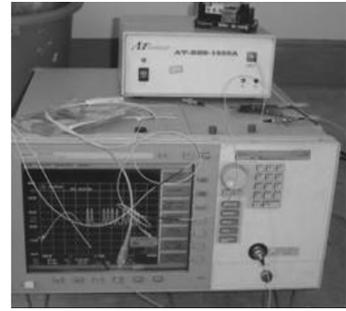


图5 光纤光栅采集系统

Fig. 5 Fiber grating acquisition system



图6 U型水银压力计

Fig. 6 U-type mercury manometer

变值。

试验工况:全封堵情况;不同排水量情况。

### 3.2 试验结果分析

通过模型试验,得到全封堵条件及不同排水量条件下衬砌水压力的分布规律。

1)全封堵时。全封堵条件下,注浆圈外侧的渗透压随进水口水压的关系曲线如图7所示,衬砌背后水压力随进水口水压的关系曲线如图8所示,外水压0.1 MPa时注浆圈外及衬砌背后水压分布规律如图9所示。

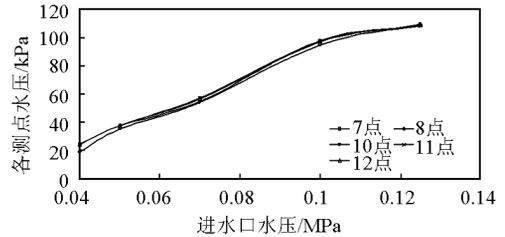


图7 全封堵条件下注浆圈外侧各点水压规律曲线

Fig. 7 The law of water pressure behind the grouting material under the condition of undrained state

2)不同排水量时。试验过程中当水压加载到

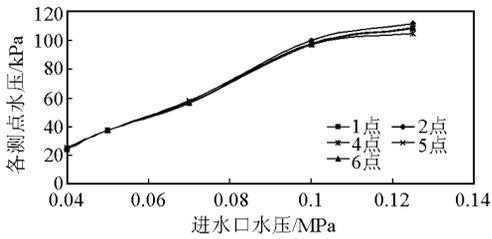


图8 全封堵条件下衬砌背后各点水压规律曲线  
Fig. 8 The law of water pressure behind the lining under the condition of undrained state

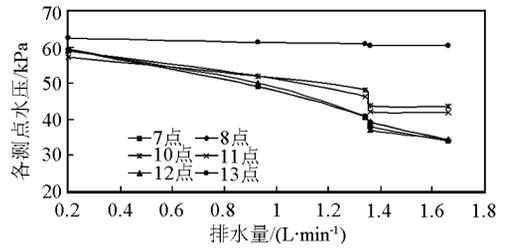


图11 注浆圈外侧各点水压与排水量关系曲线  
Fig. 11 Relationship between water pressure and discharge behind the grouting material

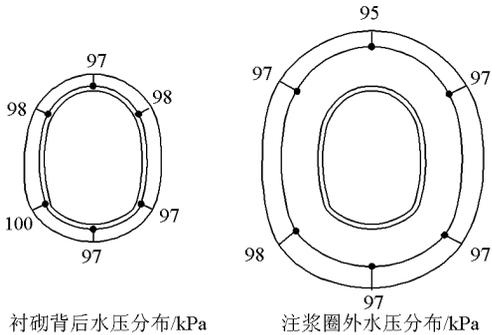


图9 外水压 0.1 MPa 时注浆圈外及衬砌背后水压分布  
Fig. 9 The distribution of water pressure behind the lining and grouting when bear 0.1 MPa water pressure

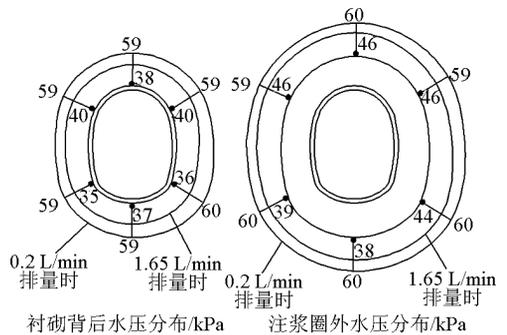


图12 不同排水量时衬砌背后及注浆圈外水压分布  
Fig. 12 The distribution of water pressure behind the lining and grouting at different drainage discharge

0.07 MPa 时,保持进水口水压 0.07 MPa 不变,逐渐增大隧道排水量,当每级排水量稳定后,记录各测点的读数,得到不同排水量条件下,衬砌背后各点水压与排水量关系曲线如图 10 所示;注浆圈外各点渗透压与排水量关系曲线如图 11 所示;不同排水量时衬砌背后及注浆圈外水压分布规律如图 12 所示。在进水口水压 0.07 MPa 作用,排量为 0.20 L/min 及 1.35 L/min 时衬砌内外侧应力如图 13 和图 14 所示,拉应力为正,压应力为负。

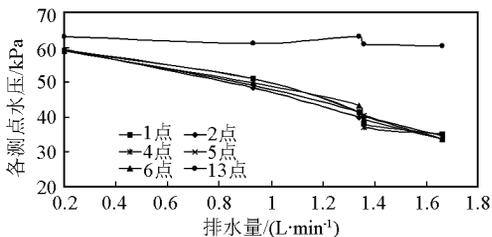


图10 衬砌背后各点水压与排水量关系曲线  
Fig. 10 Relationship between water pressure and discharge behind the lining

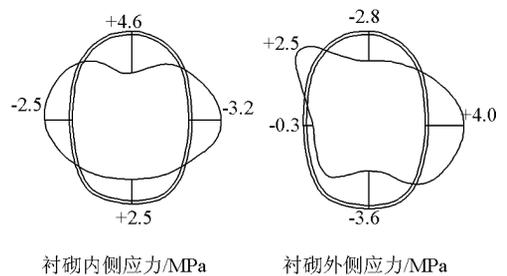


图13 土压及水压共同作用下衬砌应力 (排水量:0.20 L/min)

Fig. 13 The stress of lining at condition of 0.07 MPa water pressure combined with 0.2 L/min drainage discharge

1) 在全封堵条件下,衬砌背后和注浆圈外侧各点水压力均随进水口水压增大而增大,各点水压增长趋势基本一致。注浆圈外侧和衬砌背后水压基本一致,注浆圈对水压无折减作用。

2) 排水后衬砌背后各点水压明显减小,随着隧道排水量的增加,注浆圈外渗透压和衬砌背后水压力均逐渐减小;隧道排水量越大,各测点水压力减小

从上述试验结果,可以得出以下规律:

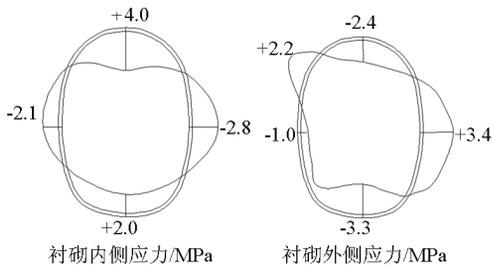


图 14 土压及水压共同作用下衬砌应力  
(排水量:1.35 L/min)

Fig. 14 The stress of lining at condition of 0.07 MPa water pressure combined with 1.35 L/min drainage discharge

的规律越明显,且基本呈直线下降;注浆圈最外侧第13测点的渗透压随排水量增大变化不明显;排水量较小时,排水口处水压减小趋势明显,随着排水量增大,排水口处水压减小程度减弱。

3)仅土压荷载作用下,隧道衬砌结构应力较小;外加水压后,衬砌受力特征发生变化,随着水压的增大,衬砌内、外侧各点应力逐渐增大,特别是仰拱、拱顶和拱腰处应力增大明显;在水土荷载共同作用下,衬砌结构受力情况相当复杂。

4)排水条件下隧道衬砌内侧应力最大值出现在拱顶,衬砌外侧应力最大值出现在拱腰,隧道排水口处水压较小;排量增大到一定程度后,结构应力不再继续减小,说明虽然设置了一定的排导系统,但隧道衬砌仍承受一定的水压。

#### 4 衬砌水压力的现场测试

1)齐岳山隧道。齐岳山隧道长 10 528 m,最大埋深 670 m,区内发育 15 条断层和多条暗河系统。监测断面位于得胜场槽谷段的 F11 断层,隧道上方 220 m 有得胜场暗河,隧道采用堵排结合的释能降压技术施工。经半年多时间的监测,得到典型测试断面的衬砌水压时态曲线如图 15 和图 16 所示。

从齐岳山隧道各个断面的监测结果来看,衬砌水压力值均较小,最大水压为 0.08 MPa,而且逐渐趋于稳定,衬砌结构受力也较小,处于安全状态。

2)大支坪隧道。大支坪隧道长 8 789 m,最大埋深 495 m,区内岩溶极其发育,溶洞与地表岩溶洼地通过岩溶管道、裂隙相通,地下水受大气降雨控制,不利水头可达 100 m。隧道采用释能降压技术

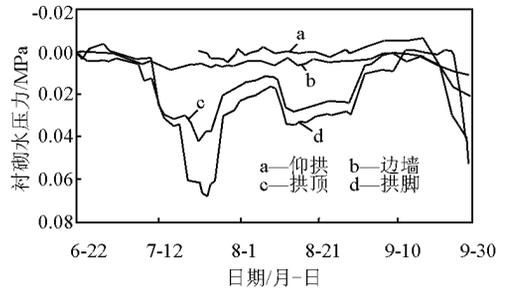


图 15 齐岳山隧道平导 PDK365 + 155 断面水压力时态曲线

Fig. 15 Water pressure time curve in the section PDK365 + 155 of Qiyueshan Tunnel

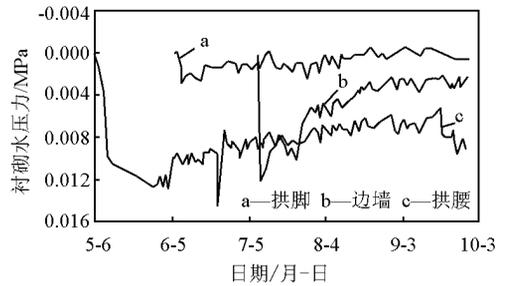


图 16 齐岳山隧道正洞 DK365 + 331 断面水压力时态曲线

Fig. 16 Water pressure time curve in the section DK365 + 331 of Qiyueshan Tunnel

施工,结构防排水系统采用堵排结合方法。“990”大型充填溶洞衬砌的水压力时态曲线如图 17 所示。

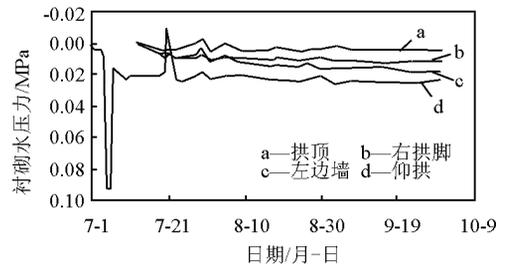


图 17 大支坪隧道 DK132 + 984 断面水压力时态曲线

Fig. 17 Water pressure time curve in the section DK132 + 984 of Dazhiping Tunnel

从大支坪隧道各个断面的监测结果来看,衬砌水压力值均较小,仰拱水压最大为 0.094 MPa,而且很快减小并稳定在 0.022 MPa,衬砌结构受力也较小,处于安全状态。

#### 5 结语

通过对岩溶隧道衬砌水压力分布规律研究,得

出以下几点结论:

1) 岩溶隧道原始水压力与隧道标高上、下强排泄基准面,受排泄基准面排泄能力,以及地表补给能力有关。

2) 如果隧道采用全封堵防水方式,隧道内不排水,则衬砌背后的水压不能折减;如果隧道采用限量排放的防排水方式,衬砌背后水压力随排水量的增加而减小。

3) 高水压充填岩溶隧道施工应尽量采用释能降压技术,降低施工中的水压力和安全风险。结构设计采取“以堵为主,限量排放”的防排水原则,通过限量排水,降低衬砌背后水压力,确保隧道运营的安全。

#### 参考文献

- [1] 高新强,仇文革. 隧道衬砌外水压力计算方法研究现状与进展[J]. 铁道工程学报,2004,4(84):128-132
- [2] 王秀英,谭忠盛,王梦恕,等. 高水位隧道堵水限排围岩与支护

- 相互作用分析[J]. 岩石力学,2008,29(6):1623-1628
- [3] 高新强. 高水压山岭隧道衬砌水压力分布规律研究[D]. 成都:西南交通大学,2005
- [4] Wang Xiuying, Tan Zhongsheng, Wang Mengshu, et al. Theoretical and experimental study of external water pressure on tunnel lining in controlled drainage under high water level [J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2008,23(9):552-560
- [5] 王建宇. 隧道围岩渗流和衬砌水压力荷载[J]. 铁道建筑技术,2008,(2):1-6
- [6] 蒋忠信. 隧道工程与水环境的相互作用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1):121-127
- [7] 张祉道. 隧道涌水量及水压计算公式半理论推导及防排水应用建议[J]. 现代隧道技术,2006,43(1):1-7
- [8] 张民庆,黄鸿健,苗德海,等. 岩溶隧道水压力的研究与确定[J]. 铁道工程学报,2008,5(116):53-58
- [9] 吉小明,白世伟,杨春和. 岩体地下流固耦合理论的研究综述[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(增1):846-849
- [10] 莫阳春,周晓军. 岩溶隧道施工围岩变形动态监测与仿真分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增2):3816-3821

## Research of water distribution of tunnel lining in Karst region

Tan Zhongsheng<sup>1</sup>, Li Jian<sup>1</sup>, Xue Bin<sup>2</sup>, Wan Xiuying<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2. Yichang - Wanzhou Railway Construction Headquarters of Ministry of Railways, Enshi, Hubei 445000, China)

[Abstract] Tunnel lining water pressure problem has been bone of contention for a long time. Relying on Yichang - Wanzhou Railway karst tunnels to research on distribution of lining water pressure on different anti - drainage patterns (the whole block, block combined with drainage and drainage mode). The primary research method was model test and field monitoring. Model test scale was 1:16, and test apparatus could be applied earth pressure and water pressure. Acquiring the distribution of lining water pressure by model test: the lining water pressure can't discounted and reduced by the grouting ring at the condition of whole block; the lining water pressure reduced significantly and linear decreased as the development of drainage discharge at the condition of block combined with drainage, simultaneously, the better the effect of grouting, the more outstanding the water pressure reduce; the lining still bear a certain degree of water pressure at the condition of drainage. A part of conclusion about distribution of lining water pressure from model test has been verified in field monitoring.

[Key words] tunnel in Karst region; whole block; controlled drainage; water pressure; model test