

# 岩溶隧道衬砌水压力分布统计分析及模糊评价

王一鸣<sup>1,2</sup>, 阳军生<sup>1</sup>, 罗禄森<sup>3</sup>, 林 辉<sup>1</sup>

(1. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 郑州市市政工程勘测设计研究院, 河南 郑州 450046;  
3. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘 要:** 对国内典型岩溶隧道衬砌水压力实测数据进行统计, 分析衬砌水压力的影响因素, 主要包括: 地质构造、围岩渗透性、岩溶水补给、岩溶水排泄和岩溶水垂直分带. 基于实测数据研究不同防排水方式下衬砌水压力的分布规律, 全排水设计时衬砌水压力很小, 全封堵设计时衬砌水压力几乎等于静水压力, 释能降压处理能大幅度降低衬砌水压力, 堵水限排设计可通过控制排水量以降低衬砌水压力. 在衬砌水压力实测数据统计分析的基础上, 建立隧道水压力模糊综合评价体系, 根据水压力模糊评价结果, 对隧道防排水方式的选择提出建议.

**关键词:** 衬砌水压力; 统计分析; 影响因素; 防排水方式; 模糊评价

**中图分类号:** 451 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.02.009

## 0 引言

我国岩溶分布很广, 随着我国交通基础设施建设的快速发展, 越来越多的山岭隧道修建在岩溶区. 由于高水压的作用, 保证衬砌结构的长期安全性是一个难题. 隧道由于高水压引起衬砌结构开裂的病害时有发生, 如三峡翻坝高速季家坡隧道暴雨后, 衬砌承受高水压而开裂<sup>[1]</sup>. 因此有必要开展岩溶隧道衬砌水压力分布特征的研究, 分析衬砌水压力的影响因素、分布规律, 指导隧道结构设计, 保证衬砌结构安全.

近年来, 对岩溶发育程度的影响因素进行了较多的研究, 而缺乏对衬砌水压力的影响因素进行深入分析. 虽然对典型岩溶隧道的衬砌水压力进行了一些现场测试, 但没有进行系统的统计分析, 也没有具体指出不同防排水方式下衬砌水压力的分布特征<sup>[2-3]</sup>. 衬砌水压力影响因素众多, 如何全面考虑这些因素, 合理选择防排水方式, 在工程设计中也没有统一的标准<sup>[4]</sup>.

笔者对国内典型岩溶隧道衬砌水压力实测数据进行统计, 分析水压力的影响因素和不同排水方式下衬砌水压力的分布特征, 通过隧道水压力模糊综合评价, 对隧道防排水方式的选择提出建议.

## 1 隧道衬砌水压力的影响因素分析

### 1.1 地质构造

不同地质构造带, 地下水富集程度和运动特征不同, 水压力大小也不同. 梨树湾隧道中梁山背斜段水压力为 1.0 ~ 1.5 MPa, 圆梁山隧道毛坝向斜段水压力为 4.5 MPa<sup>[5]</sup>, 锦屏二级水电站隧洞断层破碎带处水压力为 10 MPa<sup>[6]</sup>. 断层带裂隙率高, 有利于岩溶水的流通, 岩溶发育往往强烈, 水压力很高. 向斜轴部属于聚水区, 岩溶水常富集于轴部, 水压力较高. 背斜轴部产生张应力, 张裂隙发育, 水沿着裂隙作垂直运动, 然后再向两翼运动, 水压力较低.

### 1.2 围岩渗透性

围岩渗透性对渗流场有较大影响, 进而影响衬砌水压力的大小. 围岩渗透性越弱, 水压力折减系数越小, 外水压力越小. 围岩渗透性越强, 水压力折减系数越大, 外水压力越大. 广州抽水蓄能电站压力隧洞围岩渗透性从弱变化到强时, 水压力折减系数从 0.038 变化到 0.9<sup>[6]</sup>.

### 1.3 岩溶水补给

岩溶水的补给条件对隧道水压力也有较大影响. 如果深部岩溶水与上部具有较好的水力联系,

收稿日期: 2014-10-30; 修订日期: 2014-12-29

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAK24B02); 中国中铁股份有限公司科技开发计划重点项目(39-2010)

作者简介: 王一鸣(1988-), 男, 河南郑州人, 硕士, 主要从事地下工程方面的设计与科研工作, E-mail: success0728@126.com.

大气降水渗入地表,会继续下渗补给岩溶水,雨水渗入到隧道附近,导致隧道结构承受较大的水压力.如果岩溶水补给不良,则水压力较小.

齐岳山隧道水压力随降雨量的变化曲线见图 1<sup>[7]</sup>.隧道上方存在暗河,隧道、暗河、地表建立良好的水力联系.隧址区 2006 年 9 月 8 日突降暴雨,雨水渗入到隧道附近,水压力增大.

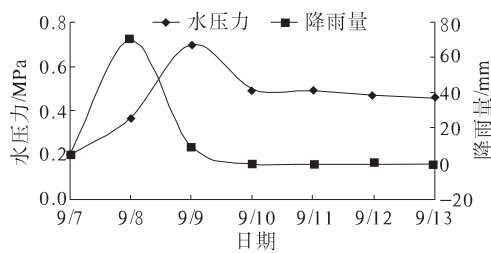


图 1 齐岳山隧道降雨量-水压力关系图

Fig.1 The relationship between water pressure and rainfall capacity of Qiyueshan Tunnel

1.4 岩溶水排泄

岩溶水排泄点或在隧道以上,或在隧道以下,或不存在排泄点.不同排泄情况下隧道水压力的统计见表 1.

表 1 不同排泄情况下水压力统计  
Tab.1 The statistics of water pressure for different drainage facilities

隧道	上排泄点	下排泄点	水压力 /MPa	折减系数	备注
圆梁山隧道	有	无	2.73	0.49	文献[5]
鲁竹坝隧道	无	有	0.098	0.041	文献[8]
齐岳山隧道	无	无	3.1	0.87	文献[7]

当隧道标高以上存在排泄点时,水压力近似为上排泄点与隧道高程之差,属于中折减.当隧道标高以下存在排泄点时,水压力很小,属于强折减.当隧道标高上、下不存在强排泄点,水压力近似等于静水压力,属于弱折减.

1.5 岩溶水垂直分带

当隧道穿越岩溶水垂向渗流带时,涌突水风险较小,水压力较小.当隧道穿越岩溶水水平径流带时,地下水循环交替程度强,岩溶强烈发育,涌突水风险较大,水压力较大.应山岩隧道穿越岩溶水平径流带,岩溶强烈发育,水压力达到 2 MPa<sup>[3]</sup>.

2 不同防排水方式的衬砌水压力分布

2.1 全排水设计

隧道采用全排水设计时,衬砌背后的水完全

排出,衬砌水压力很小,接近于 0.襄渝铁路中梁山隧道采用全排水设计,衬砌水压力接近于 0<sup>[9]</sup>.

2.2 全封堵设计

武广高铁金沙洲隧道穿越岩溶发育区,采用全封闭防水设计,全断面敷设防水板.选择 DK2194+752 断面进行衬砌水压力监测,监测结果见图 2.

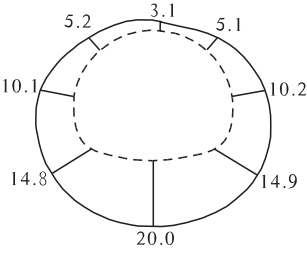


图 2 DK2194+752 断面衬砌水压分布 (单位:kPa)

Fig.2 Water pressure on lining of section DK2194+752 (unit:kPa)

监测结果表明,仰拱衬砌水压力最大,拱顶最小.全封堵型防水结构,地下水不能排出,衬砌水压力几乎等于静水压力.

全封堵设计,衬砌水压力很大,运营期衬砌可能开裂.圆梁山隧道 2#溶洞段全封堵衬砌,水压力达到 1.923 MPa,运营期发现水从衬砌接头缝隙或混凝土衬砌本身渗入隧道内<sup>[5]</sup>.

2.3 释能降压处理

宜万铁路岩溶发育,高压涌水难控,为减小水压力,在施工中采用释能降压的处理措施.通过爆破打开溶腔,释放高压水,削减水压力.

大支坪隧道“990 溶腔”进行释能降压处理后,典型断面从 2009 年 7 月 1 日至 12 月 4 日进行水压力监测<sup>[10]</sup>,衬砌水压力分布见图 3.

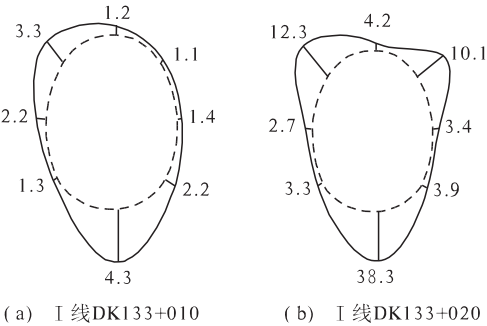


图 3 大支坪隧道典型断面衬砌水压力分布图 (单位:kPa)

Fig.3 Water pressure on lining of typical sections of Dazhiping Tunnel (unit:kPa)

宜万铁路另外 4 条典型岩溶隧道释能降压处理后,衬砌水压力监测结果如下:马鹿箐隧道为

51.2 kPa, 云雾山隧道为 36.2 kPa, 野三关隧道为 6.3 kPa, 齐岳山隧道为 38.1 kPa.

经释能降压处理后, 衬砌水压力普遍较小, 大多分布在 0~40 kPa 之间. 衬砌水压力最大值一般位于仰拱. 释能降压法对降低衬砌水压力效果明显.

2.4 “注浆+排导”的堵水限排设计

重庆轨道交通一号线中梁山隧道采用“注浆+排导”的堵水限排设计, 通过注浆控制地下水排放标准为  $1\text{ m}^3 \cdot (\text{m} \cdot \text{d})^{-1}$ , 设置“两侧沟+中心沟”的排导系统. 典型断面衬砌水压力测试结果见图 4<sup>[11]</sup>.

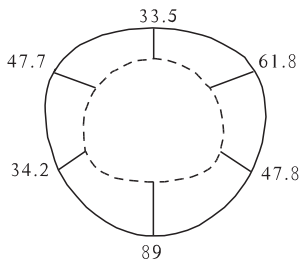


图 4 DK25+470 断面衬砌水压力分布 (单位: kPa)

Fig. 4 Water pressure on lining of section DK25+470 (unit: kPa)

测试断面衬砌水压力远小于衬砌水压力设计值 1 MPa. “注浆+排导”的堵水限排处理有效地降低了衬砌水压力, 仰拱承受较大的水压力.

“两侧沟+中心沟”的排水方式在边墙脚设排水孔, 拱墙衬砌背后的水可通过盲管排出, 但仰拱背后积水无法排出, 对仰拱结构受力不利. 武九线某隧道运营期持续强降雨后隧道内中心排水沟不能排除仰拱下积水, 仰拱承受高水压而开裂<sup>[12]</sup>.

2.5 不同防排水方式的衬砌水压力分布规律

基于对不同防排水方式衬砌水压力测试结果的统计分析, 不同防排水方式对衬砌水压力的影响和衬砌水压力折减系数见表 2.

表 2 不同防排水方式的衬砌水压力分布规律

Tab. 2 Population distribution characteristics of water pressure on lining with different drained designs

防排水方式	衬砌水压力分布规律	衬砌水压力折减系数
全排水设计	水压力很小	0~0.1
全封堵设计	近似等于静水压力	0.9~1.0
释能降压	大幅度降低衬砌水压力	0.1~0.2
“注浆+排导”	可通过控制排水量	
堵水限排	以降低衬砌水压力	0.2~0.9

3 隧道水压力大小的模糊综合评价

岩溶隧道水压力实测数据分析表明, 隧道水压力受到多种因素的影响, 不同防排水方式的衬砌水压力分布特征不同. 采用模糊综合评价的方法, 综合考虑各影响因素, 对隧道水压力的大小进行评价, 根据水压力评价结果选择合理的防排水方式.

3.1 隧道水压力模糊综合评价体系

3.1.1 建立因素集

因素集是隧道水压力影响因素的一个集合. 根据对岩溶隧道水压力实测资料的分析, 确定水压力的影响因素, 进而建立因素集见图 5<sup>[3]</sup>.

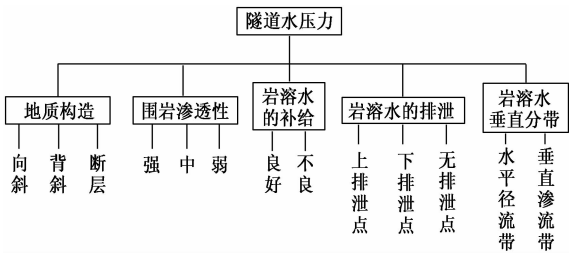


图 5 隧道水压力影响因素分解图

Fig. 5 Hierarchy structures of the influence factors of water pressure on liner

3.1.2 建立评价集

根据前述水压力实测数据的统计分析, 将水压力的评价结果分为“低”“中”“高”“极高”4 个等级<sup>[3]</sup>, 建立评价集如表 3 所示.

表 3 水压力评价结果分级

Tab. 3 The evaluation result gradation of water pressure

级别	评价含义
低	水压力 0~0.5 MPa
中	水压力 0.5~1.5 MPa
高	水压力 1.5~3 MPa
极高	水压力 3 MPa 以上

3.1.3 建立模糊评价矩阵

首先对因素集  $U$  中单因素  $u_i$  作单因素评判, 从因素  $u_i$  着眼该评判对象对评价集  $V$  中评价等级  $v_j$  的隶属度为  $r_{ij}$ , 得到因素  $u_i$  的单因素评价集  $r_i$ ,

$$r_i = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{im}). \quad (1)$$

这样从因素集的每个因素出发就构造出一个总的评价矩阵  $R$ .

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

隧道水压力的影响因素不便量化, 不便采用

相关隶属度函数. 笔者采用专家调查法,聘请隧道工程领域相关专家,对结果进行统计分析,确定各因素的隶属度. 如果共有  $n$  位专家,从因素  $u_i$  着眼该评判对象被评价为等级  $v_j$  的共有  $m$  位专家,则因素  $u_i$  在评价等级  $v_j$  上的频率分布为  $m/n$ ,于是该因素的隶属度  $r_{ij} = m/n$ .

3.1.4 建立因素权重集

建立模糊评价矩阵后,尚不足以对事物做出评价. 各个因素在评价目标中有不同的地位和作用. 为反映各个因素相对于评价目标的重要程度,对各个因素赋予一个权数  $a_i$ ,建立因素权重集  $A$ ,且满足  $\sum a_i = 1$ .

$$A = \{a_1, a_2, \cdots, a_n\}. \tag{3}$$

笔者采用层次分析法确定各因素权重,首先对因素集中各因素两两比较,建立判断矩阵  $C$ .

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix}. \tag{4}$$

式中: $c_{ij}$  表示从因素  $i$  和因素  $j$  相对于评价目标的重要程度, $c_{ij}$  采用常用的“1—9 标度法”<sup>[3]</sup> 确定.

然后求出矩阵  $C$  的最大特征值  $y_{\max}$  和其相应的特征向量  $A$ ,即  $CA = y_{\max}A$ ;则  $A$  的分量即为相应  $n$  个因素的权重;判断矩阵  $C$  尚需进行一致性检验,使其满足一致性比率  $CR < 0.1$ .

3.1.5 进行模糊合成和做出评价

用因素权重集  $A$  对评价矩阵  $R$  中不同的行进行综合,可得到模糊评价结果集  $B$ . 笔者采用模糊变换  $B = A \times R$ ,得到模糊评价结果.  $B$  尚需进行归一化处理得到  $B'$ ,使其满足  $\sum b_i = 1$ . 结合评价结果集  $B'$ ,根据最大隶属度原则,即取  $b_i$  中最大者,确定被评价对象的评价结果分级.

3.2 根据水压力大小选择不同的防排水方式

通过对隧道水压力的模糊综合评价,根据评价结果,选择合适的防排水方式:① 如果溶洞规模大,水压力为“极高、高”级,采用释能降压的处理方式;② 如果溶洞规模小,水压力为“中”级,采用“注浆 + 排导”的处理方式;③ 如果水压力为“低”级,且地表沉降控制严格,水资源需严格保护,可考虑采用全封堵设计;④ 全排方式处理时,衬砌结构承受很小的水压力,但是水资源损失较多,需慎用.

3.3 模糊评价应用实例

大支坪隧道 DK132 + 990 处发育大型富水充

填型溶腔,位于唐坪向斜构造带,溶腔段为三叠系大冶组灰岩,围岩渗透性强.“990 溶腔”与上部含水裂隙、管道连通,直接接受上部地下水的补给,地下水补给良好. 该处地表为水谷坝岩溶槽谷,隧道标高以上发育强排泄点. 该溶腔段位于岩溶水平径流带,岩溶强烈发育.

(1) 建立评价集  $V = \{\text{低、中、高、极高}\}$ .

(2) 建立评价矩阵. 选取设计、施工、科研单位相关技术人员 20 名,对该该隧道水压力的大小进行评价. 单因素评价结果统计见表 4.

表 4 单因素评价结果

Tab. 4 Single factor evaluation results

项目	低	中	高	极高
地质构造	3	5	6	6
围岩渗透性	1	2	7	10
岩溶水补给	1	2	8	9
岩溶水排泄	2	4	6	8
岩溶水垂直分带	2	2	7	9

根据评价结果统计,计算出隶属度,进而确定模糊评价矩阵  $R$ ,

$$R = \begin{bmatrix} 0.15 & 0.25 & 0.3 & 0.3 \\ 0.05 & 0.1 & 0.35 & 0.5 \\ 0.05 & 0.1 & 0.4 & 0.45 \\ 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.4 \\ 0.1 & 0.1 & 0.35 & 0.45 \end{bmatrix}. \tag{5}$$

(3) 建立因素权重集. ① 两两比较各因素,根据其相对重要性程度,结合表 4,构造判断矩阵  $C$ ,

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1/2 \\ 3 & 1 & 1/3 & 1/2 & 1/3 \\ 5 & 3 & 1 & 1 & 1/2 \\ 5 & 2 & 1 & 1 & 1/3 \\ 2 & 3 & 2 & 3 & 1 \end{bmatrix}. \tag{6}$$

② 计算最大特征值对应的特征向量,并经一致性检验,且满足一致性比率  $CR < 0.1$ ,如此可求得权重集  $A$ .

$$A = (0.06, 0.14, 0.27, 0.24, 0.29).$$

(4) 模糊综合评价及防排水方式选择  
进行模糊变换  $B = A \times R$ ,并经归一化处理  $B' = (0.082, 0.133, 0.349, 0.436)$ .

根据最大隶属度原则,大支坪隧道 990 溶腔,隧道水压力评定为极高级. 大支坪隧道“990 溶腔”段岩溶强烈发育,采用释能降压法进行处理,以保证施工安全.

4 结论

(1) 影响隧道水压力的因素主要包括:地质

构造、围岩的渗透性、岩溶水的补给、岩溶水的排泄和岩溶水垂直分带、向斜和断层区、围岩渗透性强、岩溶水补给良好、岩溶水排泄不良和水平岩溶带等区域的水压力较大。

(2)不同防排水方式影响衬砌水压力的大小。全排水设计时,衬砌水压力很小;全封堵设计时,衬砌水压力几乎等于静水压力;释能降压处理能大幅度降低衬砌水压力;“注浆+排导”的堵水限排设计也能降低水压力,但仰拱衬砌水压力较大,是该排水方式下衬砌结构的薄弱部位。

(3)建立了隧道水压力的模糊综合评价体系,根据实测数据统计分析建立因素集和评价集,水压力评价结果分为“极高”“高”“中”“低”四级,据水压力模糊评价结果分级,合理选择不同的防排水设计方式。并以宜万铁路大支坪隧道为例验证了该模糊综合评价模型。

### 参考文献:

- [1] 许振浩,李术才,李利平,等. 一种典型的岩溶隧道衬砌压裂突水灾害成因与防治[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(7):1396-1404.
- [2] 何明磊,胡磊,孟祥磊. 隧道衬砌水压力荷载及内力研究[J]. 铁道标准设计,2014,58(2):79-83.
- [3] 王一鸣. 高水压岩溶隧道衬砌结构受力特征和防排水设计研究[D]. 长沙:中南大学土木工程学院,2014:29-41.
- [4] 王建宇. 隧道工程高水头地下水的处治[J]. 现代隧道技术,2013,50(1):46-52.
- [5] 张宇,万晓燕,陈礼伟. 圆梁山隧道溶洞地段抗水压衬砌结构试验分析[J]. 中国铁道科学,2006,27(4):62-67.
- [6] 宋岳,贾国臣,滕杰. 隧洞外水压力折减系数工程地质研究[J]. 水利水电工程设计,2007,26(3):38-40.
- [7] 袁慧. 高水压岩溶隧道衬砌水压力特征研究[D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2009:43-45.
- [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):53-58.
- [9] 梅志荣,张军伟,李传富. 铁路长大隧道建设中地下水防治有关问题研究进展[J]. 铁道工程学报,2009,132(9):78-82.
- [10] 张梅. 岩溶隧道高压富水充填溶腔释能降压新技术[M]. 北京:科学出版社,2010:105-169.
- [11] 迟永利. 中梁山隧道穿越富水岩溶区施工技术研究[D]. 北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2011:58-61.
- [12] 李国英. 岩溶地区隧道仰拱开裂的整治[J]. 铁道标准设计,2007(1):68-71.

## Statistical Analysis and Fuzzy Synthetic Evaluation of Water Pressure Load on Lining of Karst Tunnel

WANG Yi-ming<sup>1,2</sup>, YANG Jun-sheng<sup>1</sup>, LUO Lu-sen<sup>3</sup>, LIN Hui<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. Zhengzhou City Municipal Engineering Design & Research Institute, Zhengzhou 450046, China; 3. China Railway Er'yuan Engineering Group Limited Company, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Based on the statistical analysis of water pressure load on tunnel lining, the main influencing factors of water pressure are analyzed. The main control ingredients are geological structure, rock permeability, the supply and drainage of Karst water, vertical zonation of Karst water. The population distribution characteristics of water pressure on liner are also studied with different drained designs. A large number of drainage leads to a small water pressure on lining. When full-sealing water proofing lining is employed, the water pressure on lining is equal to hydrostatic pressure. When Karst water is released, the water pressure can be reduced sharply. The water pressure on lining can be weakened by controlled drainage design. Based on the statistics of data measured in field, a fuzzy synthetic evaluation system of water pressure is established. According to the evaluation results of water pressure, reasonable choice of different drainage patterns can be acquired.

**Key words:** water pressure load on lining; statistical analysis; influencing factor; design of drainage; fuzzy synthetic evaluation