

文章编号:1006—2106(2005)06—0037—04

深埋岩溶隧道水压力的预测与防治

蒋忠信*

(铁道第二勘察设计院,四川 成都 610031)

摘要:研究目的:为保护洞顶水资源和环境,深埋岩溶隧道“以排为主”的设计原则已不适应环保要求,开始尝试“以堵为主”的防排水原则。封堵地下水会使隧道衬砌承受巨大水压力,“以堵为主”的关键问题是预测和防治隧道水压力。

研究方法:隧道水压力受地下水水头损失和地下水与衬砌接触面积的双重影响,据此在调整岩溶隧道水头折减系数的基础上,分析隧道水压力模式。

研究结果:给出了用渗流量确定隧道水压力的公式,继而讨论了基于水环境平衡的适度排水和围岩注浆的防治原则,并给出了注浆圈和其内衬砌的水压力的计算公式。

研究结论:引用锦屏二级水电站探洞和渝怀铁路圆梁山隧道的实测资料对上述水压力公式进行检验,其计算的隧道水压力较符合实际。

关键词:深埋岩溶隧道;水资源和环境;水头折减系数;衬砌水压力;注浆圈水压力;渗流量;圆梁山隧道

中图分类号: U452 **文献标识码:** A

1 隧道水压力问题

我国铁路、公路的越岭隧道尤其是岩溶山区长隧道通常采用的“防排结合,以排为主”的防排水原则,因不能根治隧道水害,而且导致洞顶地下水位下降,地表水资源枯竭,恶化生态环境,严重影响人民的生产和生活,而不能适应水环境保护的要求。为保护洞顶山区的水资源和环境,近年来隧道防排水开始尝试“以堵为主”的原则^[1-3]。但是,隧道封堵地下水便会承受巨大水压力,尤其是深埋岩溶长隧道,水压力往往高达若干兆帕,使衬砌难以承受。因此确定隧道外水压力成为设计中的一个关键问题。

隧道水压力系含水层作用于隧道外壁的静水压力,其计算方法目前尚处于探讨阶段^[3,4],故仍主要借用土工隧洞的经验性折减系数法^[5]来估算。近来,铁二院开始探讨隧道水压力的计算公式^[1,6],但尚不尽完善。因此有必要进一步探讨隧道水压力的预测模式。

2 水压力折减系数

土工隧洞的外水压力,通常是对水头高度 h 加以

折减而得。经验性水头折减系数 β 为一综合性指标,包括外水压力传递过程中受阻的水头损失,水压作用于隧道的面积和排水卸压情况等因素,主要根据隧洞洞壁渗漏水情况而选择^[5]。

作用于完全不渗漏水隧道衬砌的水压力 P_0 ,为水头高度 h 与折减系数 β 之乘积,即:

$$P_0 = \beta h / 100 \text{ (MPa)} \quad (1)$$

在隧道的设计阶段,隧洞尚未开凿,无法根据洞壁渗漏水情况而预先选择折减系数。因此,岩溶隧道设计时宜按岩溶程度来确定折减系数 β 值,而岩溶程度近似采用渗透系数 K 来表征。

在现有的岩溶折减系数表^[5,7]的基础上,考虑到岩溶通过对地下水运动所致水头损失和对衬砌作用面积这两方面的影响而改变水压力,并参考一些隧道水压力实测值,将折减系数 β 调整成与渗透系数 K 的数量级相对应的等差数列,结果如表 1。

3 有渗流衬砌的外水压力

对于深埋于含水层的隧道,尤其是岩溶隧道,其经折减后的水压力 P_0 值往往仍然过大,衬砌难以直接承

* 收稿日期: 2005—03—22 蒋忠信 教授级高级工程师 中科院成都山地所客座研究员 男 1941 年 5 月出生

** 基金项目 国家自然科学基金资助项目(90202007)

表 1 据岩溶程度的水头折减系数 β 值

岩溶强度	岩溶类型	透水性	渗透系数 $K/(m/d)$	β
微弱	溶孔型	微弱透水	< 0.01	< 0.1
弱	溶隙型	弱透水	$0.01 \sim 0.1$	$0.1 \sim 0.2$
			$0.1 \sim 1$	$0.2 \sim 0.35$
中等	隙洞-洞隙型	透水	$1 \sim 10$	$0.35 \sim 0.55$
强	管道-强洞隙型	强透水	> 10	$0.55 \sim 1.0$

受,因此在能保持洞顶水资源恢复和水环境平衡的前提下,允许隧道适当渗漏水以减压,从而减小衬砌和止水工程,应是经济合理的^[6]。

3.1 外水压力公式

分析表明,衬砌渗流一方面造成能量损失,另一方面还减小了水作用于衬砌外表面的面积,衬砌外水压力的降低受这两方面的叠加影响。

渗流的能量损失所致水压力降低值 ΔP_1 可根据势能原理推求。设单位长度衬砌的允许渗流量为 q (m^2/d),则渗流使洞顶含水层中质量为 q 的水体从含水层顶面下降到洞顶,垂直下降距离为 h ,故其势能为 (qgh) ,能量损失 $\Delta P_1 = qgh$ 。同理,设单位长度未衬砌的毛洞洞壁的自然稳定涌水量为 q_s ,则其造成能量损失 $P_0 = q_s gh$ 。因此渗流能量损失比:

$$\Delta P_1 / P_0 = (qgh) / (q_s gh) = q / q_s$$

$$\text{即 } \Delta P_1 = P_0 (q / q_s) \quad (2)$$

另一方面,因为衬砌的渗透性远小于围岩,渗流作用于衬砌表面的面积小于作用于不透水衬砌的面积,由此所致水压力降低值为 ΔP_2 。岩溶水与衬砌的作用面积为衬砌外表面积减去衬砌渗流通道的面积。在洞顶高程处的均匀平面渗流场中,由于水头值、渗透系数相近,根据达西定律,渗流速度应近似一致,故衬砌渗流通道的面积与渗流量 q 成正比。设衬砌渗流通道的面积为 S ,不透水衬砌的外表面积为 S_s ,则岩溶水作用于渗流衬砌外表面积比作用于不透水衬砌的外表面积减少 q / q_s ,水压力相对减小值即为:

$$\Delta P_2 / P_0 = S / S_s = q / q_s$$

$$\text{或 } \Delta P_1 = P_0 (q / q_s) \quad (3)$$

由式(2)、(3)可见,渗流的能量损失所致水压力降低值 ΔP_1 与作用面积减少所致水压力降低值 ΔP_2 的量值相同,仅考虑单一因素时的衬砌水压力均为:

$$P = P_0 - P_0 (q / q_s) = P_0 (1 - q / q_s) \quad (4)$$

此式与张祉道根据竖井地下水稳定流的拉普拉斯方程和达西定律给出的渗流衬砌外水压力公式^[1]的形式一致,异途同归。

但渗流对衬砌外水压力的影响毕竟是双重的。综

合渗流的能量损失和减小作用面积对衬砌外水压力的重叠影响,则单位长度衬砌的渗流量为 q (m^2/d) 时衬砌承受的外水压力 P 为(MPa):

$$\begin{aligned} P &= \Delta P_1 \cdot \Delta P_1 \\ &= P_0 (1 - q / q_s)^2 \\ &= (\beta h / 100) (1 - q / q_s)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)即为允许渗流的隧道衬砌的外水压力预测公式。此式与文献[6]的公式 $P = P_0 [1 - (q / q_s)^{1/2}]$ 尚有区别。

3.2 算例:锦屏二级水电站探洞^[8]

测得该探洞中 3 处堵水段的漏水量($q, m^3/s$)分别为 0.04、0.19、0.40,封堵前的涌水量($q_s, m^3/s$)分别为 0.60、0.66、2.73,实测水压力(MPa)分别为 7.42、10.22、10.12,测点高程平均为 1 387 m。据探洞附近的干海子高程 3 780 m 地面发生新岩溶塌陷推之,地下水位高程 $\leq 3 700$ m。据此,(5)式中的参数为: $\beta = 0.65$; $h \leq 3 700 - 1 387 = 2 313$ m; $(1 - q / q_s)^2$ 分别为 0.8711、0.5071、0.7284,平均为 0.7022。

据(5)式,3 处堵漏段外水压力平均值 P 为:

$P \leq (0.65 \times 2313 / 100) \times 0.7022 = 10.56$ MPa,与实测的平均值(9.253 MPa)基本一致。

如果改按文献[1]公式计算,则 $P = 12.52$ MPa,比实测值 9.253 MPa 偏大较多。

4 隧道水压力防治对策

隧道工程与水环境形成相互作用链^[9]。水环境对隧道工程的作用表现为隧道漏水和产生水压力。“以排为主”的防排水原则,可降低隧道外水压力,减小衬砌工程。但隧道工程对水环境的反作用导致洞顶水资源枯竭,水环境失衡,引发生态和环境灾害。隧道实施“以堵为主”的措施,在大气降水补给大于隧道渗漏的条件下,隧道工程对水环境的反作用转变为洞顶水环境的恢复进程:地下水位上升,疏干漏斗缩小,水资源逐渐达到新的平衡,环境灾害得以减轻甚至消除。同时,隧道承受的水压力增大,工程数量和费用增长。

基于洞顶水环境平衡的隧道水压力防治对策之一,就是在“以堵为主”的前提下,允许隧道适量渗漏水,其关键是掌握渗排水量的适度。即一方面,渗排水量要小于洞顶疏干漏斗范围内的大气降水入渗量,使洞顶水环境得以修复;另一方面据(5)式计算,渗排水要能导致隧道水压力有一定程度降低,以使隧道工程经济合理。

如果根据(5)式计算,将衬砌水压力降低到可承受值时,所需的渗排水量过大,使洞顶水环境得不到修复甚至进一步枯竭,则应结合防治隧洞突涌水灾害,对围

岩进行注浆止水,使注浆形成的止水圈分担相当大的一部分水压力。

止水圈承受的水压力 P_1 (MPa)按(5)式计算。设注浆后的毛洞涌水量为 q_1 ,则:

$$P_1 = (\beta h / 100)(1 - q_1 / q_s)^2 \quad (6)$$

此时,注浆圈内完全不渗水的隧道衬砌承受的水压力 P_2 (MPa)为:

$$P_2 = (P_0 - P_1) \quad (7)$$

当由于注浆的力度不够或质量不高, P_2 仍然过大,且还允许隧道衬砌适度渗漏水(q , m^3/d)来减压时,则:

$$P_2 = (P_0 - P_1)(1 - q / q_1)^2 \quad (8)$$

实践^[1,2,9]中,常采用小导管超前注浆,并在开挖后进行径向注浆或帷幕注浆,形成止水圈。注浆止水圈减压后,隧道衬砌再以适量排水进行部分减压,进而根据水压力和围岩压力进行渗水减压衬砌的结构设计和防水设计。

5 隧道水压力实例

渝怀铁路圆梁山深埋岩溶隧道全长 11 068 m,其中进口段 2 050 m 通过毛坝向斜二叠系碳酸盐岩层承压含水层。由于承压水头高达 460 m,故隧道首先采用了注浆止水减压措施。据文献^[10]报道的现场实测资料,隧道正洞的 DK354+460~+490 充填溶洞段,由于厚 5 m 的围岩注浆体在高水压下破坏而发生突涌水,后于 2002 年 12 月 28 日至 2003 年 1 月 10 日实测水压力稳定值为 2.73 MPa,稳定涌水量为 230 m^3/h ;该溶洞穿过的平行导洞 PDK354+430~+470 段,其围岩注浆体未被破坏,同步实测注浆圈内渗透水压力稳定值为 1.50 MPa;已开挖、注浆并部分衬砌的正洞、导洞稳定涌水量共为 150 m^3/h 。

该溶洞段正洞的静水头高度 $h=460$ m, 实测水压力 $P_0=2.73$ MPa,故水头折减系数 $\beta=0.59$ 。表 1 所列强岩溶围岩的经验性水头折减系数大于 0.55,与此实测值范围一致。

该溶洞由正洞通向导洞,导洞段的水压力 P_0 也应为 2.73 MPa。实测导洞注浆圈内渗透水压力为 1.50 MPa,故注浆圈承受的水压力 $P_1=2.73-1.50=1.23$ MPa。本导洞段的原稳定涌水量 q_s 应与相应正洞段相同,为 230 m^3/h 。其注浆后的涌水量未单独实测,近似地以已开挖、注浆并部分衬砌的正洞、导洞总涌水量的 1/2 计,为 75 m^3/h 。据此按式(6)计算,得注浆圈承受的水压力 P_1 为 1.24 MPa。即当注浆后毛洞涌水量约为注浆前的 1/3 时,计算的注浆圈水压力与实测值一致。

注浆止水减压后,实测水压力仍达 1.50 MPa,如果隧道钢筋混凝土衬砌按承受 1.0 MPa 水压力设计,则

还应允许衬砌适度排水减压。以此按式(8)反算,衬砌渗排水量应不小于注浆圈渗流水量的 18.4%,即每延米不小于 8.3 m^3/d ,远大于计算的基于水环境恢复的允许渗水量(1.09 $\text{m}^3/\text{d}^{[6]}$)。虽然如此,但因隧道绝大部分通过弱岩溶围岩,渗透系数平均为 0.0234 m/d ,其水压力和涌水量都会比上述溶洞段小得多,整座隧道的渗水量仍可能不会超过允许渗水量。

6 结束语

6.1 “以堵为主”的防排水原则,使预测隧道水压力成为关键问题

长期以来,深埋岩溶隧道遵循的“以排为主”的防排水原则,直接导致了洞顶山区水资源涸竭与水环境失衡,引发生态与环境灾害。为保护水资源和环境,深埋岩溶隧道防排水“以堵为主”的呼声日高,并已在渝怀铁路歌乐山隧道^[2]、圆梁山隧道进行尝试。封堵地下水将使隧道承受巨大水压力,预测隧道水压力成为关键问题之一。

6.2 隧道水压力的预测与防治可按以下 3 步进行

6.2.1 按式(1),据水头折减系数 β 对静水头加以折减,换算成未注浆、未衬砌的毛洞的水压力。水头折减系数按围岩岩溶化程度据表 1 选定。

6.2.2 经折减后的毛洞水压力往往过大,可通过适量排水进行减压。排水量应小于大气降水入渗量,以便修复洞顶的水环境。排水减压后的隧道水压力据渗流量按(5)式计算。

6.2.3 适量排水有两层措施。一是结合突涌水防治,对围岩进行注浆,形成止水圈减压;二是衬砌渗漏水减压。止水圈承受的水压力和其内有渗衬砌承受的水压力分别按式(6)、(8)进行计算。

6.3 需进一步深入探讨的问题

上述岩溶水水头折减系数还是经验性的,据渗流量建立计算外水压力的公式尚未能从运动机理缜密推演,也还未经受较多的实测检验。因此,本文的研究还是初步的。尚需在今后的研究和实践中进一步深入探讨。

参考文献:

- [1] 张祉道. 山岭隧道地下水处理及结构设计探讨[J]. 铁道工程学报, 1995, (1): 103-111.
- [2] 赵健. 隧道岩溶水地质灾害治理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2003, 14 (3): 112-115.
- [3] 王建秀, 杨立中, 何静. 深埋隧道外水压力计算的解析-数值法[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(3): 17-19.
- [4] 陈崇希, 刘文波, 彭涛. 确定隧道外水压力的地下水流模型[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29 (5): 62-64.

- [5] 王建秀, 杨立中, 何静. 深埋隧道衬砌水荷载计算的基本理论[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21 (9): 1139-1143.
- [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] 邓宜明. 圆梁山隧道毛坝向斜有关岩溶水文地质问题的浅见[J]. 铁道工程学报, 2002, (3): 42-46.
- [8] 任旭华, 陈祥荣, 单冶钢. 富水区深埋长隧洞工程中的主要水问题及对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23 (11): 1924-1929.
- [9] 石新栋. 圆梁山隧道主要地质问题及对策[J]. 岩土工程界, 2002, 5 (6): 44-46.
- [10] 张民庆, 彭峰. 圆梁山隧道毛坝向斜水压力监测分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (6): 702-705.
- (编辑 慕成娟)

CALCULATION AND CONTROL OF WATER PRESSURE ON KARST DEEP TUNNEL

JIANG Zhong-xin

The second Survey and Design Institute of Railway, Chengdu 610031, China

Abstract: Research purpose: for protecting water resource and environment on tunnel, strengthening water drainage as a design principle can not meet the demand of environmental protection, with choking up underground water as a design principle of karst deep tunnel begin tried already. The tunnel lining endures huge water pressure when underground water is blocked up, in which a key problem is calculating and controlling water pressure on tunnel at choking up underground water. Research method: because the water pressure is influenced double by head loss and contact area between karst water and tunnel lining, based on regulate decrease coefficient of head on karst tunnel, analysis model of water pressure on tunnel. Research result: the formula calculating the water pressure on karst tunnel with vadose water discharge is advanced. Then, control principle with suitable drainage and grouting in country rock based on water environmental balance on the tunnel is discussed, and formulas calculating the water pressure on grouting circle and lining of tunnel are advanced. Research conclusion: above formulas calculating the water pressure are tested with measured data in prospect cavity of the second Jinping hydropower plant and in Yuanliangshan tunnel of the Chongqing-Huaihua railway as an examples, and the water pressure values more conform to reality.

Key words: karst deep tunnel; water resource and environment; decrease coefficient of head; water pressure on tunnel lining; water pressure on grouting circle; Yuan Liangshan tunnel



(上接第 27 页)

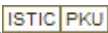
THE COMPRESSION ULTIMATE BEARING CAPACITY SIMPLIFY CALCULATION FOR ROUND-ENDED MASSIVE PIERS UNDER BIAXIAL ECCENTRICITY

ZHU Er-yu, LIU Lei, HAI Chao

School of Civil Engineering and Architecture, Beijing Jiaotong University

Abstract: The bearing capacity is an important check content for concrete and stone piers. Under limit states design method, the material can not bear pulling force in tensile area, and compressive stress presents rectangle distribution. The bearing capacity's calculation is very complicate for round-ended massive piers under this hypothesis. For the convenient design, a reduction factor is introduced similar to the allowance stress state's. It is introduced for the principle and process to solve the reduction factor of compression by using graphic solution. By using multiple regression analysis, it is presented to a group of the reduction factor of compression formulas of round-ended massive piers. The formulas are simple, practical and meet the precision request. They can apply to current design.

Key words: round-ended massive piers; limit states design method; eccentricity; the reduction factor

作者: 蒋忠信, [JIANG Zhong-xin](#)
作者单位: [铁道第二勘察设计院, 四川, 成都, 610031](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF RAILWAY ENGINEERING SOCIETY](#)
年, 卷(期): 2005(6)
被引用次数: 10次

参考文献(11条)

1. 张祉道 [山岭隧道地下水处理及结构设计探讨](#) 1995(01)
2. 赵健 [隧道岩溶水地质灾害治理](#)[期刊论文]-[中国地质灾害与防治学报](#) 2003(03)
3. 王建秀;杨立中;何静 [深埋隧道外水压力计算的解析-数值法](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#) 2002(03)
4. 陈崇希;刘文波;彭涛 [确定隧道外水压力的地下水流模型](#)
5. [确定隧道外水压力的地下水流模型—读〈深埋隧道外水压力计算的解析-数值法〉一文随笔](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#) 2002(05)
6. 王建秀;杨立中;何静 [深埋隧道衬砌水荷载计算的基本理论](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2002(09)
7. 蒋忠信 [隧道工程与水环境的相互作用](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2005(01)
8. 邓宣明 [圆梁山隧道毛坝向斜有关岩溶水文地质问题的浅见](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2002(03)
9. 任旭华;陈祥荣;单治钢 [富水区深埋长隧洞工程中的主要水问题及对策](#)[期刊论文]-[岩石力学与工程学报](#) 2004(11)
10. 石新栋 [圆梁山隧道主要地质问题及对策](#)[期刊论文]-[岩土工程界](#) 2002(06)
11. 张民庆;彭峰 [圆梁山隧道毛坝向斜水压力监测分析](#)[期刊论文]-[岩土工程学报](#) 2003(06)

本文读者也读过(10条)

1. 张民庆, 黄鸿健, 苗德海, 田四明, ZHANG Min-qing, HUANG Hong-jian, MIAO De-hai, TIAN Si-ming [岩溶隧道水压力的研究与确定](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#)2008(5)
2. 林国进, 李玉文 [垫江~邻水高速公路岩溶隧道设计](#)[会议论文]-2004
3. 王建秀 [深埋隧道外水压力计算中几个问题的探讨——对“读《深埋隧道外水压力计算的解析-数值法》一文随笔”的答复](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#)2003, 30(1)
4. 段双喜, Duan Shuangxi [复杂岩溶隧道反坡抽排水系统设计与应用](#)[期刊论文]-[山西科技](#)2009(1)
5. 彭涛 [对深埋隧道外水压力问题的几点讨论](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#)2003, 30(2)
6. 赵仕礼, ZHAO Shi-li [双联拱隧道防排水施工技术 with 通病防治措施](#)[期刊论文]-[重庆交通大学学报](#)2006, 25(z1)
7. 吴琼, Wu Qiong [富水地层盾构隧道变形的成因和防治](#)[期刊论文]-[都市快轨交通](#)2008, 21(5)
8. 于松伟 [城市轨道交通建设管理模式变革与设计施工总承包](#)[期刊论文]-[中国勘察设计](#)2004(3)
9. 王建秀 [深埋隧道外水压力计算中几个问题的探讨\(II\)](#)[期刊论文]-[水文地质工程地质](#)2003, 30(4)
10. 丁浩, 蒋树屏, 陈林杰, DING Hao, JIANG Shu-ping, CHEN Lin-jie [公路隧道外水压力的相似模型试验研究](#)[期刊论文]-[公路交通科技](#)2008, 25(10)

引证文献(10条)

1. 杨波, 徐树斌, 严松宏 [围岩水压力影响因素分析](#)[期刊论文]-[甘肃科技](#) 2010(3)
2. 陈林杰, 蒋树屏, 丁浩 [公路隧道外水压力折减规律研究](#)[期刊论文]-[重庆交通大学学报\(自然科学版\)](#) 2008(3)
3. 汪高举 [华蓥山矿区岩溶水害防治方法探讨](#)[期刊论文]-[华北科技学院学报](#) 2009(4)
4. 齐斌文 [圆梁山隧道溶洞长期监测的分析](#)[期刊论文]-[西部探矿工程](#) 2011(8)
5. 李志明 [地下注浆堵水技术在百花滩隧道施工过程中的应用](#)[期刊论文]-[科技信息](#) 2009(25)
6. 张民庆, 黄鸿健, 苗德海, 田四明 [岩溶隧道水压力的研究与确定](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2008(5)
7. 程盼, 李亮, 邹金锋, 赵炼恒, 罗伟 [基于植被生态需水的隧道排水量确定方法研究](#)[期刊论文]-[铁道学报](#) 2013(7)

8. [邓祥辉](#) [考虑外水压力的山岭深埋隧道变形分析](#)[期刊论文]-[铁道建筑](#) 2011(4)
9. [邹静娴](#), [许模](#), [杨艳娜](#) [隧道施工涌突水处理方法综述](#)[期刊论文]-[地下水](#) 2010(2)
10. [孙谋](#), [刘维宁](#) [高风险岩溶隧道掌子面突水机制研究](#)[期刊论文]-[岩土力学](#) 2011(4)

引用本文格式: [蒋忠信](#), [JIANG Zhong-xin](#) [深埋岩溶隧道水压力的预测与防治](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2005(6)