

隧道地下水处治的设计理论及方法研究*

李苍松 胡元芳 丁建芳 吴丰收 郑波

(中铁西南科学研究院有限公司 成都 611731)

摘要 隧道施工地下水的处治问题一直困扰着隧道工程界,对地下水作用的认识仍未达成共识,为此需要从概念上和方法上对本问题进行深入研究。本文在国内外研究现状分析基础上,开展了隧道施工对地下水渗流变化的影响分析、隧道水压力物理模型试验研究、隧道衬砌水荷载及其相关问题的数值分析,提出针对不同防排水模式的水荷载计算模式、隧道地下水处治的理念和方式。主要创新点如下:明确提出高水压的概念,建立隧道衬砌水压力计算的概念模型,提出针对隧道不同埋深段及地下水发育状况采取不同处理策略的隧道防排水原则,研究成果为高压富水隧道设计提供了理论依据。

关键词 隧道 施工 地下水压力 处治 防排水

中图分类号:U453.6⁺1 文献标识码:A

RESEARCH ON DESIGN THEORY AND METHODOLOGY FOR TUNNEL GROUNDWATER TREATMENT

LI Cangsong HU Yuanfang DING Jianfang WU Fengshou ZHEN Bo

(China Railway Southwest Research Institute Co., Ltd., Chengdu 611731)

Abstract The problem of underground water treatment in tunnel construction had plagued tunnel engineering community for a long time. The understanding of underground water action mechanism had not reached a consensus. So it needs to deep study on this issue from concept to methodology. This paper is based on the analysis of the research status. The impact analysis of tunnel construction on the changes in groundwater seepage is carried out. The physical model tests of the tunnel water pressure is done. Numerical analysis of tunnel lining water load and its associated problems are carried out. Then, the tunnel water load calculation model is proposed under different anti-drain modes, with tunnel groundwater treatment concepts and methods. The main innovation are as follows: a) the concept of high water pressure is clearly put forward, b) the conceptual model of the tunnel lining water pressure calculation, c) the tunnel waterproofing and drainage principles to adopt different processing strategies for different tunnel depth segments and groundwater development status. The research result provides a theoretical basis for design of high pressure water tunnel.

Key words Tunnel, Construction, External water pressure, Treatment, Waterproofing and drainage

* 收稿日期:2012-05-20;收到修改稿日期:2012-06-23.

基金项目:铁道部重大科研课题-隧道围岩稳定性及其控制技术研究(2009G005-D)项目资助.

第一作者简介:李苍松,主要从事隧道及地下工程地质、水文地质及物探技术研究. Email: Li_cangsong@126.com

1 引言

隧道工程施工的整个过程中,地下水问题始终伴随。如何经济、合理地处理好地下水问题,往往关系到隧道工程的成败,是隧道工程界一直探讨的问题。多年来,众多专家、学者在此方面曾做过大量研究工作,但对诸多问题特别是对地下水作用的认识仍未达成共识。

随着西部大开发项目建设的深入开展,在我国西南地区隧道建设必然遇到大量的高压富水长大隧道。与此同时,随着我国国民经济的发展,隧道设计理念应适时更新以适应环保对隧道工程建设的需要。不同的防排水理念,对隧道衬砌结构设计方案产生直接影响。为此,值得深入开展隧道地下水处治的设计理论及方法课题研究。

2 国内外研究现状分析

针对隧道地下水处治问题,各部门结合不同的社会经济条件和历史时段,采取了不同的措施并提出相应的规范^[1~5]。在隧道设计理念上主要有3次较大的转变:20世纪90年代前,全排水;20世纪90年代后至本世纪初,全断面超前注浆堵水,抗水压衬砌;目前,以堵为主,限量排放。出现这样的转变,与各部门针对当时的社会经济条件以及对富水地层中地下水压力对支护结构的影响认识不一致有一定关系,特别是对外水压力能否折减争议更大。

尽管存在争议,目前人们基本趋向于:以环境保护为前提,因地制宜、综合治理的理念,隧道结构设计充分考虑隧道工程结构与地下水本身规律间的相互作用关系,采取适合于环境的防排水措施。

综合以上分析,获得以下认识:

(1)需要深入开展隧道地下水处治的设计理念及方法的基础理论研究,澄清支护结构、围岩与地下水相互作用规律的认识,为设计提供理论依据;

(2)隧道工程师和水文地质专家在地下水与隧道结构的相互作用问题上存在一定程度的认识脱节现象,亟待对本问题深入研究,特别是基本概念和方法的研究;

(3)为适应环境保护要求的不断变化,隧道设计理念应不断更新,迫切需要一种能直接为隧道设计服务、实用性较强的水压力计算方法。同时,隧道衬砌水荷载问题系统研究也是相应的隧道规范修订

的需要。

3 隧道施工对地下水渗流变化的影响分析

3.1 围岩初始渗流场研究

地下水作为一种特殊的不良地质体,其储存场所和运动通道为土、岩石或裂隙中的空隙,空隙的多少、大小、形状、连通情况和分布规律对地下水的分布和运动规律具有重要影响。地下水的运移有其本身的补给、径流和排泄规律,但针对不同的研究区域,受构造影响的程度不同以及区域地理及水文条件的不同,其补-径-排规律千差万别^[6]。

隧道工程施工揭露地下水,给现场人员及隧道工程师一种表面现象:地下水无孔不入,随机性很大。但事实上,从区域水文地质条件角度分析,地下水有其特殊的补给-径流和排泄规律。特别指出,隧道可看作一种特殊地下水井,其对地下水的排泄属于人工排泄。

3.2 隧道地下水涌水量、水压力分级标准研究

我国各个部门在围岩分级中对地下水出水状态的描述基本一致,均分为3级。

(1)水电部门的《水利水电工程地质勘察规范》(GB50287-99)中^[7],按照渗水量将地下水状态分为三级:即,干燥至渗水滴水、线状流水、涌水。在DLT 5195-2004中^[5]细分为5级。

(2)铁路系统中(TB10003-2005),按照渗水量将地下水状态分为3级^[8],分别为干燥或湿润,偶有渗水,经常渗水。

(3)公路系统采用了国标《工程岩体分级标准G50218-94》,按照水压和出水量将地下水出水状态分为3级^[9]。

国外情况:美国 Wickham(1972)提出的岩石结构分级(RSR)分类法^[10]中按照地下水的渗流量将地下水状态分为4个等级。南非 Bieniawski(1976)提出的岩体地质力学分级系统(RMR)分类法^[11~12]中根据水压力和渗水量两个指标将地下水状态分为5个等级。挪威 Barton(1974)Q分类法^[13]中根据水压力和地下水渗水情况将地下水状态分为6个等级,确定相应的地下水折减系数 J_w ,将水压力分成4个等级。

文献中常可见到“高水压”的提法。究竟多大的水压可称为“高水压”?目前国内外尚无明确

义。在此,结合前述地下水出水状态描述分析,建议根据水压力值大小将水压力分为3级,即,低水压、中等水压和高水压(表1),将大于0.5MPa的水压力定义为高水压。

表1 水压力分级建议标准

Table 1 Proposed standards of water pressure classification

水压力分级	水压力值/MPa	出水状态描述
低水压	<0.25	潮湿或点滴状出水
中等水压	0.25~0.5	线状、淋雨状或小股状出水
高水压	>0.5	股状或涌流状出水

3.3 隧道开挖和支护引起的地下水渗流变化过程研究

3.3.1 隧道开挖对地下水流场的影响

(1)不同埋深和不同岩性条件下,隧道开挖对地下水流场的影响不同。将隧道分为浅埋城市地铁隧道、山岭隧道和水底隧道,进一步将山岭隧道分为洞口浅埋段、一般埋深段和深埋段。因不同隧道所穿越区域地层的含水性不同,所揭露地下水的类型不同,隧道施工对所穿越区域地下水流场的影响也必然不同。

(2)不同地形地貌及构造条件下,隧道开挖对地下水流场的影响不同。将地形地貌分为两大类:平原和山区;将地质构造简化为水平、单斜、向斜和背斜等四大类。在不同的地形地貌及构造条件的组合下,隧道开挖对地下水流场的影响是不同的。

(3)不同的隧道开挖方式对隧道地下水流场的影响也是不同的。隧道开挖后,形成新的隧道工作面或临空面,作为区域地下水流场中新的、局部排泄通道,对隧道围岩一定范围内地下水流场的径流、排泄条件进行了局部改变。至于具体改变程度,与隧道所穿越区域围岩的岩性、含水性、以及地质构造等有关。

总体上说,隧道施工揭露地下水对隧道穿越区域地下水流场的影响差异较大,不能一概而论,水压力不能简单折减。

3.3.2 不同隧道支护条件下地下水渗流条件的变化

将隧道支护条件分为四种:不支护、超前支护、初期支护和二次衬砌。

不支护条件下,隧道成为地下水新的排泄通道,任其自然,隧道围岩一定范围内的地下水直到排泄疏干为止。尤其是浅埋隧道,排水疏干对地表生态环境影响较大;超前支护条件下,对隧道开挖工作

面进行超前注浆,目前对围岩注浆后衬砌水压力是否会因围岩渗透系数的减小而降低问题存在较大分歧;初期支护条件下,对隧道外围地下水有一定的阻挡作用;因二衬混凝土在多数情况下相对不透水(除非二衬混凝土质量非常差),对隧道外围地下水能够起到较明显的阻挡作用。问题的关键是,二衬混凝土作为隧道永久性结构,基于结构的长期安全性考虑,二衬混凝土结构抗水压问题一直困扰着隧道工程师。

3.3.3 不同防排水模式对隧道水荷载的影响

隧道防排水是一个综合系统,难以进行绝对区分。设计、施工规范中给定了各种不同防排水措施,这里归结为3大类:完全排水、局部防(排)水和完全堵水等。图1为隧道(洞)完全排水的地下水流场示意图(以浅埋地铁隧道为例)。图2为完全堵水隧道地下水水位示意图(据 Seok-Woo Nam, Antonio Bobet, 2005)^[14]。

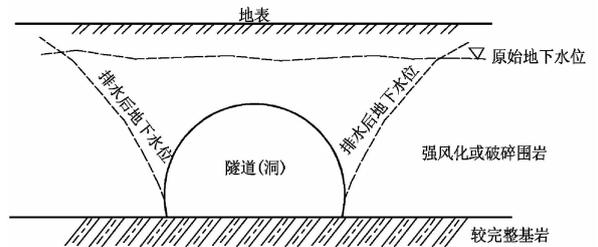


图1 隧道(洞)完全排水的地下水流场示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the groundwater flow field tunnel (hole) with a complete drain (Shallow subway tunnel, for example)

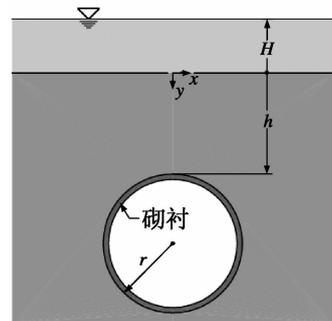


图2 不排水隧洞地下水水位示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the groundwater level with a drainage tunnel

根据工程实践经验,完全堵水是几乎不可能的。考虑生态环境及地下水环境保护要求,提出“以堵为主、限量排放”隧道设计理念,该模式下,隧道施工排放地下水对水流场的改变是局部的(图3)。

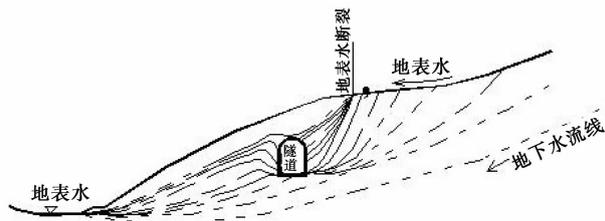


图3 隧道开挖对地下水流场的局部影响示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the groundwater flow field locally impacted by tunnel excavation

4 隧道水压力物理模型试验研究

4.1 基本假设

(1) 模拟隧道断面: 模拟隧道净空有效面积 70m^2 ($300 \sim 350\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 高速铁路单线^[13])。

(2) 试验几何尺寸相似比设计为 1:10 (或净空断面面积比为 1:100);

(3) 隧道围岩为均质各向同性, 地下水流场为稳定流、满足达西定律;

(4) 地层模型的边界相对于隧道模型应足够大, 尽量减小地层边界对隧道防排水活动的影响;

(5) 模型试验定水头高度可调节, 以模型隧道的稳定性及试验人员安全为前提。

4.2 模型试验方法

4.2.1 模型隧道的开挖

模型试验选址于中铁西南院峨眉基地, 以天然的强-全风化砂岩为模拟围岩。为避免对围岩扰

动, 采用人工凿槽方式开挖, 实际洞径: 100cm (宽) $\times 120\text{cm}$ (高), 洞长 7m 。

4.2.2 水流场试验装置准备

在模型隧道拱顶上方修筑长 2m 、宽 1m 、深 2m 的 1# 蓄水池水 (不封底)。对水池注水后, 以排水管调节水头并保持定水头高度, 使水自然下渗形成本试验渗流场 (图 4)。

4.2.3 测点埋设

在隧道模型内布设三个监测断面 (间距 2.5m), 每断面 3 个测点, 并在 2# 断面仰拱底布置一测点 (图 5)。

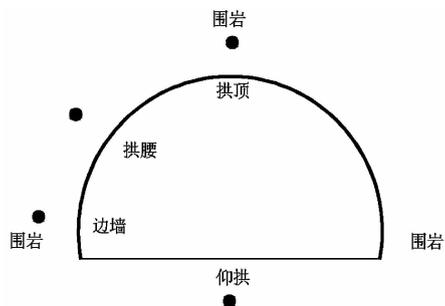


图5 水压力监测元件埋设断面示意图

Fig. 5 Schematic cross-section of planted water pressure monitoring devices

4.2.4 试验工况

简化试验条件, 试验工况如表 2 (设隧道埋深为 H)。

在拱顶上方水池中的水头高度设计为: 1m 、 2m 和 4m 等 3 种情况。

采用 C15 砂浆抹面模拟衬砌混凝土 (不排水条

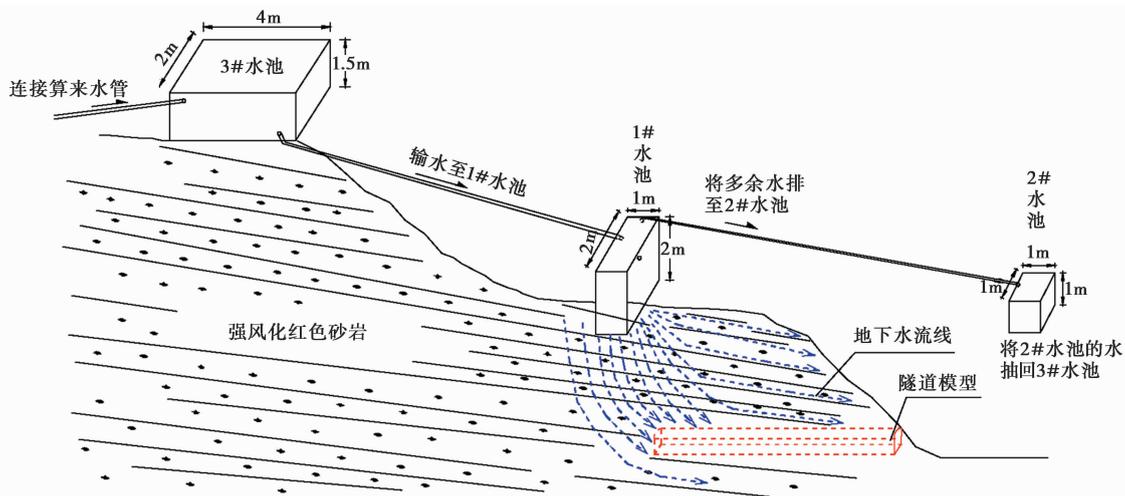


图4 水池布置示意图

Fig. 4 Schematic layout of the test pools

件),厚度设计为5cm(图6)。



图6 抹混凝土后的隧道模型

Fig. 6 The tunnel model wiped with concrete

表2 现场模型试验工况设计

Table 2 Design of site model test conditions

序号	定水头高度	开挖方式	支护类型	地下水排放方式
1	3H	全断面	无支护	全排
2	5H	全断面	无支护	全排
3	10H	全断面	无支护	全排
4	3H	全断面	二衬混凝土	不排水
5	5H	全断面	二衬混凝土	不排水
6	10H	全断面	二衬混凝土	不排水

4.3 现场试验及数据分析

分别进行1m、2m和4m高水头无支护全排水和二衬不排水条件下各种工况水压力模型试验。对各测点数据进行去初值化处理,将各断面测点绘制

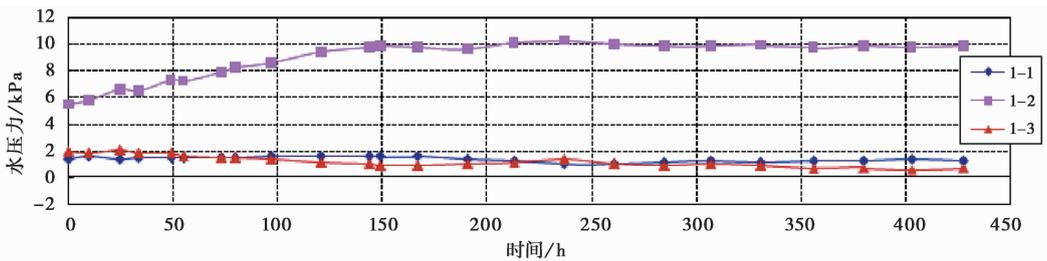


图7 1m高水头全排水条件1#断面试验结果

Fig. 7 The test result of 1# section at 1m high head with free drainage condition

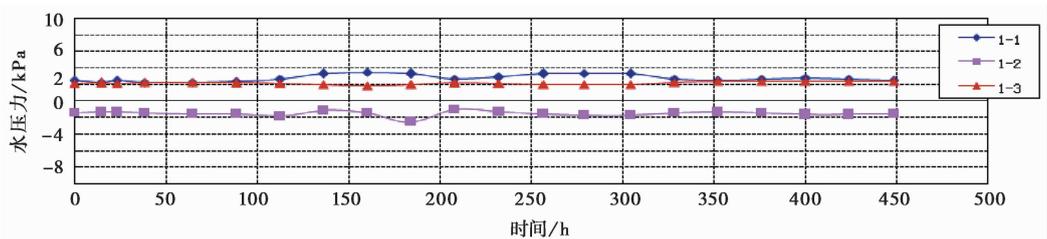


图8 1m高水头二衬不排水条件1#断面试验结果

Fig. 8 The test result of 1# section at 1m high head with lining and undrained condition

成时间-水压力值曲线。图7、图8分别为1#断面1m高水头全排水和不排水条件下的试验情况。

综合分析各工况试验曲线可知:(1)同一种支护及排水条件下,随着水头高度的增加,各测点水压力测试值的变化不完全一致;(2)同一测点同一水头高度条件下,从无支护全排水条件改变为二衬不排水条件,各测点最大水压力值总体上呈增大趋势;(3)对同一试验工况,随着时间延长,各测点水压力值总体上呈现指数曲线变化趋势;(4)本试验隧道模型埋深较浅,围岩裂隙系统较复杂,各测点数据变化较大。

通过模型实验分析,对本试验条件下隧道地下水渗流变化和水压力变化等规律有了较明确认识,与前述隧道施工地下水流场影响因素的定性分析基本一致,进一步表明围岩裂隙系统对水压力值影响较大,为水压力的定量研究和隧道地下水处治奠定了试验基础。

5 隧道衬砌水荷载及其相关问题的数值分析

5.1 计算假设及模型

5.1.1 计算假设

根据实用化计算原则,做如下假设:隧道围岩为均质、连续、各向同性介质;渗流属于恒定流且满足

Darcy 定律; 地下水位恒定, 不因隧道开挖排水而改变。

5.1.2 计算模型

隧道断面采用时速 250km 标准双线客运专线隧道断面(等效圆形隧道毛洞半径为 6.4m), 衬砌厚度为 0.4cm(图 9)。计算模型及相应参数如图 10。

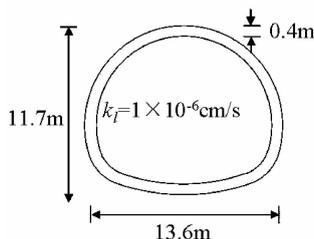


图 9 计算隧道断面示意图

Fig. 9 Schematic of the calculation tunnel section

5.1.3 计算方法及软件选择

通过 FLAC^{3D}、ANSYS 计算结果与轴对称解对比分析, 2 种不同数值方法所得的计算结果接近, 误差较小, 说明 FLAC^{3D} 与 ANSYS 都可用在衬砌水压力的计算中, 本次计算主要选用 FLAC^{3D}。

5.2 隧道衬砌水荷载及其相关问题的数值分析

5.2.1 隧道开挖、注浆、衬砌和地层因素等对围岩渗流场的影响研究

隧道开挖对局部孔隙水压力分布影响很大, 且在隧道径向指向隧道内方向上孔隙水压力急剧减小, 在渗透系数较大的地层中修建隧道, 应该预先对围岩进行注浆, 减少涌水量。在渗透系数较大的岩层中修建隧道, 建议采用注浆控制地下水流量。

5.2.2 设置防水板和排导系统的衬砌水压力特征

防水措施考虑隧底设排导与隧底不设排导 2 种情形, 围岩分不考虑注浆与考虑注浆 2 种情况, 进行衬砌水压力分析计算。在此基础上开展排水系统通畅性对衬砌水压力的影响、透水层厚度对衬砌水压力的影响、排水孔间距对衬砌水压力的影响、以及作用水头对衬砌水压力的影响分析。

5.2.3 不同排导结构水压力分布规律研究

主要对以下几种排导结构进行了简要分析, 包括: 透水底板, 在围岩中设置径向排水孔, 设置防水板和排导系统的复合式衬砌, 仰拱下设置排水沟, 泄水洞+引水孔等。

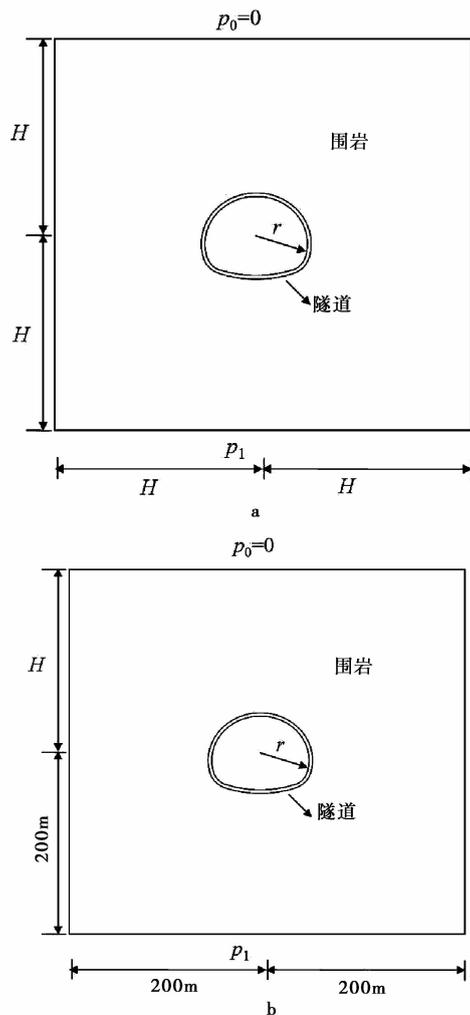


图 10 数值计算模型示意图

Fig. 10 Diagram of the numerical calculation model

a. $H \geq 200\text{m}$; b. $H < 200\text{m}$

5.2.4 地下水排放方式及排放流量与水荷载之间的相关关系研究

选取轴对称公式、保角变换公式及工程中常用的古德曼经验公式与大岛洋志公式进行涌水量预测对比分析。图 11 为各公式计算涌水量与水头的关系曲线。图 12 为全排水时隧道涌水量与注浆圈厚度关系曲线。图 13 为典型衬砌水压力折减系数与排水率的关系示意图, 并对可维护防排水系统进行了相应研究。

6 不同防排水模式下隧道水荷载的计算模式

6.1 隧道衬砌水压力计算的概念模型建立

物理涵义: 隧道衬砌水压力与扣除因地下水相

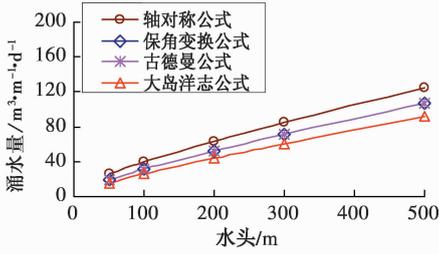


图 11 涌水量与水头的关系曲线

Fig. 11 The curve of Inflow with water head

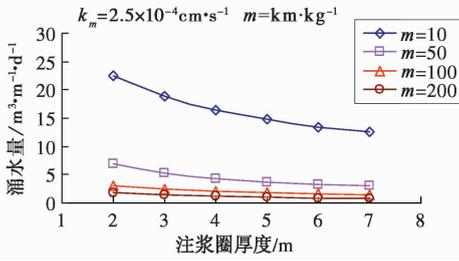


图 12 隧道涌水量与注浆圈厚度关系曲线

Fig. 12 The curve of tunnel Inflow with grouting ring thickness

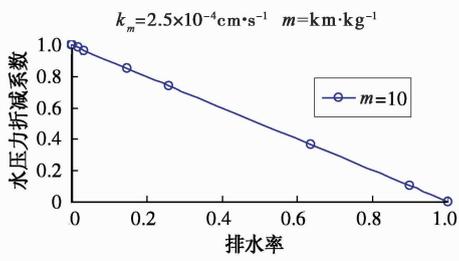


图 13 典型衬砌水压力折减系数与排水率的关系

Fig. 13 Relationship of reduction factor of typical lining water pressure with drainage rate

对渗透比率而产生的水头损失后的隧道拱顶上方地下水自重应力成正比。

用数学表达式为:

$$F \propto \left(1 - \frac{r_0}{h} f(k_c, k_r, k_s)\right) \gamma h \quad (1)$$

或

$$F = A \left(1 - \frac{r_0}{h} f\right) \gamma h \quad (2)$$

其中, γh 为隧道拱顶上方地下水自重产生的应力; A 为常量, 此处暂取值为 0.5, 具体数值应根据模型试验、现场试验及数值模拟获取的相关方程进行分析确定; γ 为地下水重度; h 为隧道拱顶相对于其上部地下水位线的埋深; r_0 为隧道半径; $f(k_c, k_r, k_s)$ 或 f 为地下水相对渗透比率,

$$f(k_c, k_r, k_s) = \frac{\sqrt{k_c k_r}}{k_s} \quad (3)$$

k_c 为二衬混凝土相对折算渗透系数; k_r 为围岩及初支系统平均折算渗透系数; k_s 为地下水初始水位线附近地层的渗透系数。

将(3)式代入(2)式,得

$$F = A \left(1 - \frac{r_0}{h} \frac{\sqrt{k_c k_r}}{k_s}\right) \gamma h \quad (4)$$

在应用(4)式进行隧道衬砌水压力计算时,与地下水流场密切相关的 3 个水文地质参数: k_c 、 k_r 和 k_s 的物理涵义从水文地质角度是明确的,但对隧道设计工程师来说,这 3 个参数的具体数值难以获取。为此,将这 3 个参数进行转换。

$$\text{令, } k_c = \frac{Q_{\text{允}}}{2\pi r_0} \quad k_r = \frac{Q_{\text{实测}}}{2\pi r_0}$$

可采用经验参考值获取 k_s [15], 于是(4)式转换为:

$$F = A \left(1 - \frac{\sqrt{Q_{\text{允}} Q_{\text{实测}}}}{2\pi h k_s}\right) \gamma h \quad (5)$$

其中, $Q_{\text{允}}$ 为单位宽度隧道衬砌所允许的地下水排放量; $Q_{\text{实测}}$ 为单位宽度围岩及初支系统实测的地下水涌水量。

6.2 试算实例——以圆梁山隧道为例

渝怀线圆梁山隧道位于渝、鄂、黔三省毗邻地区,隧道全长 11068m,最大埋深 780m。该隧道地质条件复杂,存在大规模高压涌水 [16~17]。限量排放标准为不大于 $5.0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, $Q_{\text{实测}} = 5.0 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, k_s 取值为 $8 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

$$\begin{aligned} F &= A \left(1 - \frac{\sqrt{Q_{\text{允}} Q_{\text{实测}}}}{2\pi h k_s}\right) \gamma h \\ &= 0.5 \times \left(1 - \frac{\sqrt{5 \times 50000}}{2\pi \times 780 \times 8}\right) \times 0.01 \times 780 \\ &= 0.5 \times 0.987 \times 0.01 \times 780 \\ &= 3.85 \text{ MPa} \end{aligned}$$

根据张民庆、彭峰等资料(圆梁山隧道毛坝向斜水压力监测分析),水压力监测值最高达到 2.73MPa,注浆后水压力降低到 1.5MPa。

7 隧道地下水处治的理念和方式

富水隧道建设中,对地下水的处治原则主要有 2 种:一是“以排为主”的防排水原则,对于高压地下水一概采用疏排方式;另一种是“以堵为主”的防排水原则,采取封堵的方式。2 种方式各有优缺点和适用条件(表 3)。

表3 隧道地下水处治一般理念的优缺点分析

Table 3 Analysis of the advantages and disadvantages of the general concept on tunnel groundwater treatment

防排水原则	优点	缺点
以排为主	(1)设计计算中往往不考虑水压力对衬砌结构的作用,隧道衬砌厚度设计大大减薄。 (2)节省了隧道建设初期的投资。	(1)大量地下水被长期排走,疏干,地下水位下降,洞顶地表失水沉降变形、塌陷,严重破坏生态环境。 (2)洞内涌水量不断增大,进一步疏通并扩大衬砌背后渗水通道,致使衬砌受力不均。 (3)隧道运营中常见衬砌开裂现象,衬砌渗漏变形、路面翻浆冒泥、排水沟淤塞漫流等病害逐年加重。
以堵为主	消除浅埋隧道长期排水对地表环境的不利影响	衬砌背后水压力急剧增加,增大隧道结构施工难度和初期成本,过大的激变水压可能击穿注浆加固体和增厚的衬砌结构。

表4 隧道局部防排水原则及处理对策

Table 4 Tunnel local waterproofing and drainage principles and its treatment

防排水模式	隧道埋深	富水情况	水压力等级	防(排)水原则	处理对策
局部防(排)水	浅埋段	贫水	无压		对地下水不做特殊处理,按常规防排水系统设计
		富水	低水压	以堵为主,限量排放	加强地表注浆加固、堵水和引排地表水,洞内设置合理的防排水系统
	一般埋深段	贫水	无压	以排为主	按常规防排水系统设计
		富水	低水压		
	深埋段	贫水	中等水压	以排为主,控制流量	加强围岩注浆改善围岩力学特性、降低围岩渗透特性,洞内设置合理的防排水系统
			低水压	以排为主	洞内设置合理的防排水系统
		富水	中等水压	以排为主,控制流量	加强围岩注浆改善围岩力学特性、降低围岩渗透特性,洞内设置合理的防排水系统
			高水压	排水泄压	在隧道开挖及衬砌前对周边围岩进行注浆加固,设计隧道结构可承受一定的水压力(0.5MPa),设置排水系统将进入隧道初支系统的水及时排走并泄压

注:仅在隧道深埋、高水压段考虑结构承受水压力问题,对一般埋深及中等水压段不考虑。

根据隧道周围环境的要求,富水隧道推荐采取“以堵为主,限量排放”的防排水设计准则。“堵”是为了控制流量,减小作用在衬砌结构上水压力的主要手段则是“排”,最终目的是,既减小作用在衬砌背后的水压力,又避免无限制排水对环境的永久破坏。

综合以上分析,提出新的隧道结构防排水原则:根据隧道所处环境和地下水敏感性、地层岩性等条件,充分考虑隧道工程周边的地下水环境效应,针对隧道不同埋深段及地下水发育状况采取不同的处理策略,因势利导、辩证排堵、防排合理,以排水不会对地表水环境产生较大负面影响、同时又能有效降低隧道衬砌外水压力为准则(表4)。

8 结 语

综合分析国内外对山岭富水隧道地下水处治的研究技术现状及主要存在的问题,在围岩初始渗流

场研究,隧道地下水涌水量、水压力分级标准研究,隧道施工对地下水渗流的影响等研究基础上,指出隧道设计、施工应针对不同地质、水文地质条件下区别处治地下水问题。进一步通过隧道水压力物理模型试验研究,隧道衬砌水压力及其相关问题数值分析,建立针对不同防排水模式的隧道衬砌水压力计算概念模型,提出针对隧道不同埋深段及地下水发育状况采取不同处理策略的隧道防排水原则。

参 考 文 献

- [1] 铁路隧道设计规范(TB10003-2005)[S]. 北京:中国铁道出版社,2005.
Code for Design on Tunnel of Railway(TB10003-2005). Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [2] 铁路隧道喷锚构筑法技术规范(TB 10108-2002)[S]. 北京:中国铁道出版社,2002.
Code for Shotcrete-bolt Construction Method of Railway Tunnel(TB10108-2002). Beijing: China Railway Publishing

- House, 2002.
- [3] 公路隧道设计规范(JTG D70-2004)[S]. 北京:人民交通出版社, 2004.
Disgn Specification for Highway Tunnel. Beijing: Communications Press, 2004.
- [4] 地铁设计规范(GB 50157-2003)[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
Code for Design of Metro(Gb 50157- 2003). Beijing: China Planning Press, 2003.
- [5] 水工隧洞设计规范(DLT 5195-2004)[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2004.
Specification for Design of Hydraulic Tunnel(DLT 5195- 2004). Beijing: China Water Power Press, 2004.
- [6] 王大纯, 张人权, 史毅虹. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社, 1995.
Wang Dachun, Zhang Renquan, Shi Yihong. The Basis of Hydrogeology. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [7] 中华人民共和国国家标准. GB50287-99, 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
The People's Republic of China National Standard(GB50287-99), Water Resources and Hydropower Engineering Geological Investigation Specification. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [8] 铁道第二勘察设计院. TB1003-2005 铁路隧道设计规范[S]. 北京:中国铁道出版社, 2005.
China Second Railway Survey and Design Institute. TB1003-2005. Rail Tunnel Design Specifications. Beijing: China Railway Publishing House, 2005.
- [9] 中华人民共和国水利部. GB50218-94, 工程岩体分级标准[S]. 北京:中国计划出版社, 1995.
The People's Republic of China Ministry of Water Resources. GB50218-94, Engineering Rock Mass Classification Standards. Beijing: China Planning Press, 1995.
- [10] Wickham GE, Tiedemann HR and Skinner EH. Support determination based on geologic predictions[A]. In: Proc. North American Rapid Excav. Tunneling Conf., Chicago, (eds KS Lane and LA Garfield)[M], 43 ~ 64. New York; Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs., 1972.
- [11] Bieniawski ZT. Engineering Rock Mass Classifications[M]. Wiley, New York, 1989, 251.
- [12] Bieniawski ZT. Rock mass classification in rock engineering [A]. In Exploration for Rock Engineering, Proc. of the Symp., (ed. ZT Bieniawski), 1976 [M], 1, 97 ~ 106. Cape Town: Balkema.
- [13] Barton NR, Lien R and Lunde J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support [J]. Rock Mech. 1974, 6(4): 189 ~ 239.
- [14] Seok-Woo Nam, Antonio Bobet. Liner stresses in deep tunnels below the water table[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21: 626 ~ 635.
- [15] 常士骠, 张苏民, 主编. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2007.
Chang Shibiao, Zhang Sumin. Engineering Geology (Fourth Edition). Beijing: China Architecture & Building Press, 2007.
- [16] 张民庆, 刘招伟. 圆梁山隧道岩溶突水特征分析[J]. 岩土工程学报. 2005, 27(4): 422 ~ 426.
Zhang Mingqing, Liu Zhaowei. Characteristics analysis of karst water inrush in Yuan Liangshan tunnel. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(4): 422 ~ 426.
- [17] 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.
Zhang Mingqing, Peng Feng. The analysis of water pressure monitoring in Yuan Liangshan tunnel, Maoba syncline. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(6): 702 ~ 705.