第28卷 第3期 中 国 岩 溶 Vol. 28 No. 3
2009年9月 CARSOLOGICA SINICA Sep. 2009

文章编号:1001－4810(2009)03－0288－05

深埋岩溶隧道限量排放条件下衬砌外水压力试验研究

邬 立[1],刘坡拉[2]

(1.华北有色工程勘察院有限公司,河北 石家庄 050021;2.铁道第四勘察设计院,湖北 武汉 430063)

摘 要:针对深埋岩溶隧道衬砌外水压力展开研究,根据隧道排水量和衬砌水压力模型的理论推导,结合试验进行分析。结果表明,衬砌上水压在采取排水措施后随排水量的增加而减小;但是当注浆材料渗透系数降低到1.65×10^{-6}m/s、注浆厚度到55 cm后,衬砌上水压随注浆范围的增大变化已经不太明显,说明注浆半径的选取有一个合理范围。注浆圈可以起到控制排水的作用,当给定了隧道某一段的合理排放量以后,就可以确定注浆的范围和注浆水平。

关键词:隧道外水压力;衬砌;排水量;注浆

中图分类号:TV640.31 **文献标识码**:A

在岩溶发育地区修建长大隧道时,由于地形地质条件的影响及隧道的防排水措施不同,会在隧道的某些地段形成高水压。在高水压地段施工中,若施工措施不当,可能造成突水、突泥等地质灾害,给人身和财产造成巨大威胁,并延误工程工期。若采取排水措施,会加剧地下水位下降而对生态环境产生不良影响[1]。为防止这一现象的出现,通常采取衬砌周边固结灌浆的方法。埋深较大的隧道其水压力很大,全封堵时衬砌体所承受的水压力近似于静水头压力,所以不宜采用全封堵处理方式,而排导方式则能减少衬砌体承受地下水的压力,使设计显得比较经济合理[2]。因而对高水压地段的隧道衬砌受力模式、合理的支护结构型式和预加固措施等需要进行认真研究比较,并进行试验验证以取得技术和经济的合理性,保证结构的长期安全稳定。目前在高水位深埋岩溶隧道的设计中主要采用"以堵为主、限量排放"的防排水原则,同时也是最合适的隧道防排水方式[3]。在渝怀线圆梁山隧道、歌乐山隧道设计施工中成功运用了"堵水限排"这一理念,并取得了良好的效果。

1 计算隧道排水量及衬砌外水压力的简化方法

根据地下水动力学理论,以无限含水层中的竖井为例进行理论分析,考虑隧道所处的地下水头很高,水流为稳定流,其运动规律服从Darcy定理,由竖井推导得出的结论对隧道是完全适应的[4]。

如图1,设承压含水层中有一竖井,井的内半径为r_0,衬砌外半径为r_1,由于抽水引起了水头降落,井内径处水头为h_0,外半径处水头为h_1,r_g为注浆圈半径;远场稳定水头在半径r_2处为H;衬砌渗透系数为k_1,围岩渗透系数为k_r。当地下水为静止时,隧道轴线处的水压力为$p_0=\gamma h_0$[5]。

做如下假设:

a、水层均质、各向同性,厚度不变,分布面积很大,可视为无限延伸;

b、抽水前的地下水面是水平的,并视为稳定的;

c、含水层中的水流服从Darcy定律,并在水头下降的瞬间水就释放出来。

由于假定围岩为各向同性均匀连续介质,隧道为

基金项目:中铁第四勘察设计院"宜万铁路深埋复杂岩溶隧道综合整治技术"专项研究

第一作者简介:邬立(1981－),男,博士,主要从事矿山水文地质工作。

收稿日期:2008－12－05

万方数据

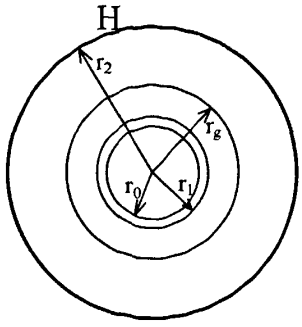

图1 竖井衬砌外水压计算示意图

Fig. 1 Calculated sketch map of shaft external water pressure

圆形,地下水头很高,水流为稳定流,这时隧道的排水量Q和衬砌外水压力P可以由上面求得的h_1和Q决定[6]。

在无注浆圈情况下:

$$Q=2\pi k_r H/\left(\frac{k_r}{k_l}\ln\frac{r_1}{r_0}+\ln\frac{r_2}{r_1}\right) \tag{1}$$

$$P=\gamma H\ln\frac{r_1}{r_0}/\left(\frac{k_l}{k_r}\ln\frac{r_2}{r_1}+\ln\frac{r_1}{r_0}\right) \tag{2}$$

在有注浆圈情况下

$$\frac{2\pi k_r(H-h_g)}{\ln\frac{r_2}{r_g}}=\frac{2\pi k_g(h_g-h_1)}{\ln\frac{r_g}{r_1}}=\frac{2\pi k_l(h_1-h_0)}{\ln\frac{r_1}{r_0}} \tag{3}$$

式中,k_l为衬砌渗透系数;k_g为注浆体渗透系数;k_r为围岩渗透系数。求得:

$$Q=\frac{2\pi Hk_r}{\ln\frac{r_2}{r_g}+\frac{k_r}{k_g}\ln\frac{r_g}{r_1}+\frac{k_r}{k_l}\ln\frac{r_1}{r_0}} \tag{4}$$

$$P=\gamma h_1\frac{\gamma H\ln\frac{r_1}{r_0}}{\ln\frac{r_1}{r_0}+\frac{k_l}{k_r}\ln\frac{r_2}{r_g}+\frac{k_l}{k_g}\ln\frac{r_g}{r_1}} \tag{5}$$

$$P_g=\gamma h_g\frac{\gamma H\ln\frac{r_g}{r_1}}{\frac{k_g}{k_r}\ln\frac{r_2}{r_g}+\ln\frac{r_g}{r_1}}+\frac{\gamma H_l\ln\frac{r_2}{r_g}}{\ln\frac{r_2}{r_g}+\frac{k_r}{k_g}\ln\frac{r_g}{r_1}} \tag{6}$$

其中h_1、h_g分别为衬砌和注浆加固圈外的水头,P_g为注浆加固圈外水压力。若r_g为变量,设$f(r_g)=\frac{d_p}{d_{r_g}}$,不难证明$f(r_g)$为负,且$\lim\limits_{r_g\to\infty}f(r_g)=0$。说明衬砌水压力随注浆半径的增大而减小,但注浆半径增大到一定程度后,衬砌水压力的减小不再明显。

2 限量排放条件下衬砌水压分布规律的试验研究

2.1 试验目的

研究不同防排水方式下衬砌水压分布规律和注浆圈对于水压的折减规律,以验证理论研究的结论,最终为"堵水限排"下衬砌水压力的计算提供参考。

2.2 试验装置和测试项目

因为试验要研究高水压情况下衬砌水压分布规律,所以试验装置设计包括稳压水箱和模型箱两大部分。稳压水箱的作用是为了提供恒定水头,本次试验稳压水头为4 m,如图2所示。图3为模型箱原理图,中间容器为压力罐,罐净高1.2 m,直径1 m,设计压力0.4 MPa,试验装置见图4。为了满足高水压要求,模型箱必须为压力容器罐,罐下部开阀门以便测流量,罐上不同位置接有测压计和测压管,为了保证排水管不被堵塞,罐底设有反滤层。

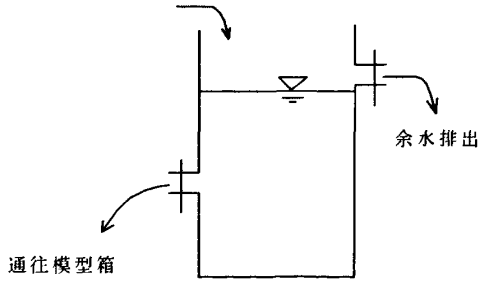

图2 稳压水箱

Fig. 2 Stabilized tank

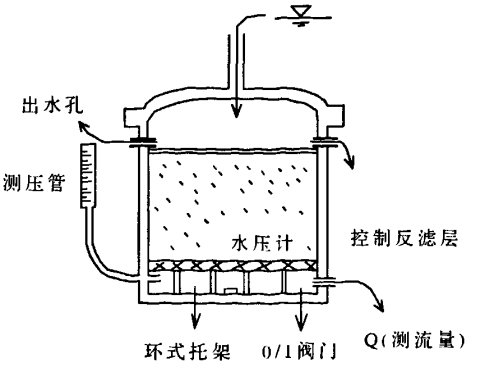

图3 模型箱

Fig. 3 Mode case

万方数据

图4 试验装置

Fig. 4 Test device

在本试验中，测试项目有流量、水压、时间，其中流量用汇流体积法测，水压通过渗压计和测压管两种手段测，时间用秒表测。

2.3 试验过程及试验工艺设计

2.3.1 试验步骤

(1)拌和试验材料；

(2)将试验材料装入容器罐，并按设计在一定位置分别放置测压管和渗压计；

(3)在罐中注水直到满罐；

(4)盖上压力罐盖子；

(5)拧紧螺栓，其中螺栓共有36个；

(6)从罐顶进水口注水，此水来自稳压水箱，加水过程中必须排除罐内空气；

(7)当底部测压计水压达到4.0 MPa时，可以开始试验；

(8)开启排水阀，通过排水阀开启的大小来控制流量，每次测量要在排水稳定一段时间后才读数，即测压管读数基本稳定后开始。开始后，用容器收集一定时间段内排水并读数，然后读取渗压计读数和测压管读数；

(9)改变排水量再重复步骤(8)；

(10)一组试验完成后，需要关闭稳压水箱到容器罐的进水阀，打开所有排水阀门排出容器罐中水，当罐中压力减至1.0 MPa时，可以松开螺栓，打开容器罐盖子；

(11)待水全部排干后，重新按设计开始下一组试验。

2.3.2 试验工艺设计

为了探求不同渗透系数的材料对衬砌水压的影响，本次试验共配制了3种材料，其中第一种为天然砂，其余两种为砂、水泥、水玻璃配合材料，目的是模拟不同的注浆材料，对每种材料，选取不同的厚度进行试验，以探求注浆材料对于水压的折减规律。

2.3.3 各种材料渗透系数的计算

单一材料渗透系数的计算按下式[6]进行：

$$k = \frac{Q}{JA}$$

式中，k 为材料渗透系数；Q 为单位时间内流量；A 为过流面积。

本次试验分别制作了3种注浆材料，渗透系数分别为 $k_1 = 2.6 \times 10^{-5}$ m/s、$k_2 = 1.65 \times 10^{-6}$ m/s、$k_3 = 9.49 \times 10^{-7}$ m/s 。

2.4 试验结果分析

2.4.1 注浆圈厚度对于水压的影响研究

为了研究注浆圈厚度对于水压的影响，本次试验针对同一种注浆材料研究了注浆厚度分别为75 cm、55 cm、35 cm时衬砌上水压以及距衬砌不同位置处水压分布，图5～7将不同注浆圈厚度下衬砌水压随排水量的曲线放在一起以便比较。从图中可以看出，在保持衬砌排水的情况下，随着注浆圈厚度的增加，衬砌上水压减少，但是注浆厚度由35 cm增加到55 cm时，衬砌上水压降低幅度比注浆厚度由55 cm增加到75 cm时降低幅度大，说明注浆圈在发挥对水压的折减作用时，注浆厚度存在一最优值，当注浆厚度达到一定值后，尽管随厚度增加，衬砌水压也会降低，但降低已经不明显了，这一点与理论分析的结论相吻合，说明了理论模型的正确性，同时也说明设计中要选择合适的注浆圈厚度，以达到堵水效果好，且经济合理的目的。

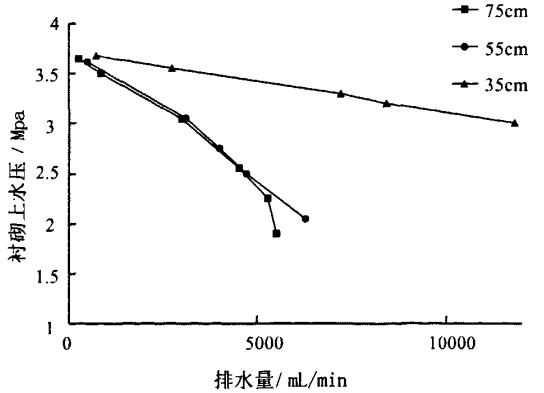

图5 注浆材料($k_1 = 2.6 \times 10^{-5}$ m/s)在不同注浆厚度下水压与排水量关系

Fig. 5 The relationship between water pressure and displacement in different thickness of k1 grouting material

万方数据

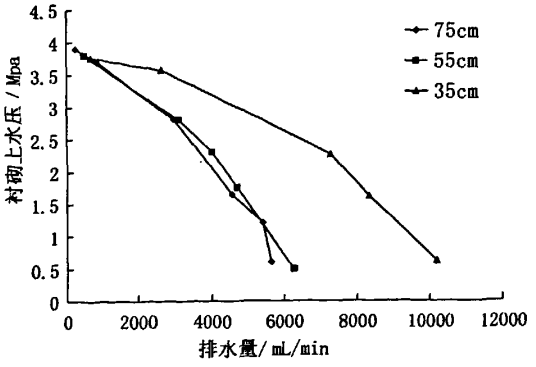

图6 注浆材料($k_2=1.65\times10^{-6}$m/s)在不同注浆厚度下水压与排水量关系

Fig. 6 The relationship between water pressure and displacement in different thickness of k_2 grouting material

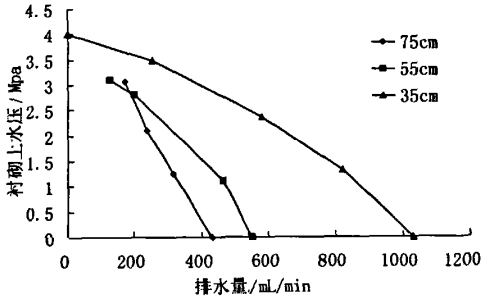

图7 注浆材料($k_3=9.49\times10^{-7}$m/s)在不同注浆厚度下水压与排水量关系

Fig. 7 The relationship between water pressure and displacement in different thickness of k_3 grouting material

2.4.2 注浆圈渗透系数对水压的影响研究

为了研究注浆圈渗透系数对于水压的影响,本次试验针对同一厚度材料研究了注浆圈渗透系数分别为$k=2.6\times10^{-5}$m/s、$k=1.65\times10^{-6}$m/s、$k=9.49\times10^{-7}$m/s的3种情况,图8~10将不同注浆材料下水压随排水量的曲线放在一起以便比较。从图中可以看出,随着注浆圈渗透系数的降低,衬砌上水压明显降低,要使衬砌上水压降低到某一值,采用较高的注浆水平可以大大减少地下水排放量和地表失水量,对保护环境非常有利的。

另外由图还可见,不论是在砂层中还是注浆材料中,随着衬砌排水量的增加,衬砌上水压和其它各位置上水压都在减少,而如果不排水,则衬砌上和其它各位置上水压都保持全水头,任何注浆都不能达到减压的目的,只有在保证衬砌排水的情况下才能达到减

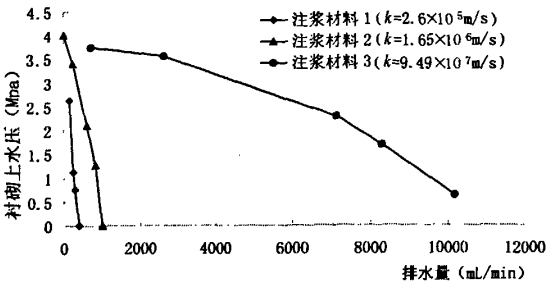

图8 注浆圈厚度35 cm时不同注浆材料水压与排水量关系

Fig. 8 The relationship between water pressure and displacement in 35 cm thick of different grouting material

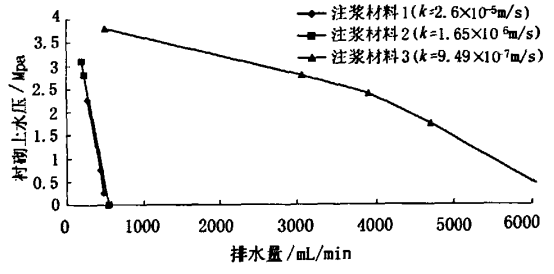

图9 注浆圈厚度55 cm时不同注浆材料水压与排水量关系

Fig. 9 The relationship between water pressure and displacement in 55 cm thick of different grouting material

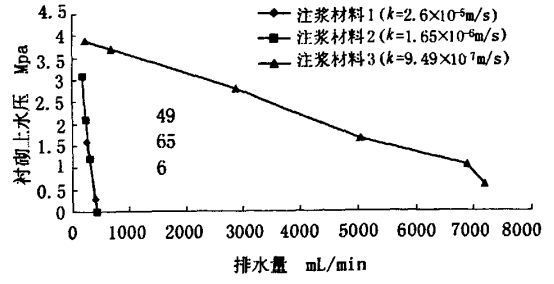

图10 注浆圈厚度75 cm时不同注浆材料水压与排水量关系

Fig. 10 The relationship between water pressure and displacement in 75 cm thick of different grouting material

小水压的目的,这一点与前述理论研究非常吻合。

3 主要结论

通过理论模型和室内试验相对比的方法研究了"堵水限排"下衬砌的水压规律以及注浆圈对于削减水压的作用,得出以下几点主要结论:

(1)采用完全封堵措施不能发挥注浆加固圈对渗

万方数据

透水压的衰减作用，只有在考虑衬砌的排水性能即采取排水措施时才能发挥注浆加固圈对渗透水压的衰减作用，且对地层注浆有助于减小地下水排放的流量；

(2)在保证衬砌排水的情况下，随着排水量的增加，衬砌上水压和注浆圈上水压都会降低；因此排水具有减压的作用；

(3)不能通过盲目增加注浆圈厚度来达到降低衬砌水压的最佳效果，设计中要选择合适的注浆圈厚度，以达到堵水效果好，且经济合理的目的。

参考文献

[1] 晏同珍. 水文工程地质与环境保护[M]. 武汉：中国地质大学出版社，1994：195－196.

[2] 张有天. 岩石隧道衬砌外水压力问题的讨论[J]. 现代隧道技术，2003，(3)：1－5.

[3] 张有天. 水工隧洞及压力管道外水压力修正系数[J]. 水力发电，1996，(12)：30－34.

[4] 邹成杰. 水利水电岩溶工程地质[M]. 北京：水利水电出版社，1994：299－301.

[5] 张有天，张武功，王镭. 再论隧洞水荷载静力计算[J]. 水利学报，1985，(3)：22－31.

[6] 陈崇希，林敏. 地下水动力学[M]. 武汉：中国地质大学出版社，1999：59－64.

Study on lining external water pressure under limited discharge in deep buried tunnel

WU Li[1], LIU Po-la[2]

(1. *North China Nonferrous Investigation Engineering Institute Ltd.*, *Shijiazhuang*, *Hebei* 050021, *China*;
2. *The Fourth Survey and Design Institute*, *China Railway*, *Wuhan*, *Hubei* 430063, *China*)

Abstract: Lining external water pressure under limited discharge in deep buried tunnel is studied in the paper by means of theoretical derivation of tunnel discharge and lining water pressure model. It is proved that lining upper water pressure decreases along with the increase of discharge after adopting drainage measures, but the lining upper water pressure increases little with the increase of cementing scope when the permeability coefficient of gount drop below 1.65×10^{-6} m/s and the grout thickness reach 55 cm, which shows that there should be a reasonable scope for cementing. Grouting can control the discharge of tunnel. Grouting area can be defined when the reasonable drainage discharge from a passage tunnel are given.

Key words: tunnel external water pressure; lining; discharge; injection grout

万方数据