

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.009

锦屏二级水电站引水隧洞减压孔布置方案优化

周 辉^{1,2},高 阳^{1,2},张传庆^{1,2},刘 宁³,卢景景^{1,2}

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室,湖北 武汉 430071;

2. 中国科学院大学工程科学学院,北京 100049; 3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司水道所,浙江 杭州 310014)

摘要:以锦屏二级水电站引水隧洞为研究对象,以衬砌最大压应力为目标,对减压孔布置方案进行优化分析。考虑减压孔孔径、间距和入岩深度的影响,通过正交设计数值试验,确定这几项因素对衬砌外缘水压力的影响程度从大到小排列顺序为:减压孔入岩深度、孔径、间距,且随着孔隙水压力的增大,不同布置方案对泄压效果的影响逐渐减弱,衬砌安装1周后,其影响范围达到0.3 MPa。因此,为降低衬砌外缘水压力,保证衬砌的安全性,宜优先考虑增大减压孔的入岩深度。通过极差分析,得到各因素对衬砌结构安全性的影响,并确定减压孔最优布置方案为间距2.86 m、孔径0.2 m、入岩深度0.2 m。

关键词:引水隧洞;减压孔布置;泄压效果;优化分析;锦屏二级水电站

中图分类号:TV732.3 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2018)01-0059-07

Layout optimization of drainage holes in the hydraulic tunnels of Jinping II Hydropower Station

ZHOU Hui^{1,2},GAO Yang^{1,2},ZHANG Chuanqing^{1,2},LIU Ning³,LU Jingjing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, School of Engineering Science, Beijing 100049, China;

3. Hydro China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Along with the exploitation of underground space approaching to the deep constantly, the high external water pressure is posing a big threat to the safety of lining structure. Drainage holes are often used to release the pressure in the engineering practice. An optimization analysis of the drainage hole layout based on the stress target of lining was carried out in this study. The effect of the drain hole diameter, spacing and entry depth in rock on the water pressure was studied by orthogonal numerical tests. The results showed that influencing factors can be ordered as entry depth, diameter and spacing, from a high influence to a low influence, and with the pore pressure increasing, the influence of different layout decreased. A week after lining installation, the influence of different layouts reached 0.3 MPa. Therefore, to reduce the water pressure on lining and ensure the safety of the lining, it's preferred to increase the entry depth. Through the range analysis, influences of factors on the lining security were obtained, and the optimal drainage holes arrangement scheme was determined as 2.86 m in spacing, 0.2 m in diameter and 0.2 m in entry depth, which means a great significance for the drainage hole design of hydraulic tunnels.

Key words: hydraulic tunnel; drainage hole; pressure relief effect; optimization analysis

随着我国基础建设的蓬勃发展,已经或即将开工建设许多深埋水工隧洞工程,这些工程普遍具有埋深大、洞线长、地下水丰富、地质条件复杂等特点。随着工程向岩体深部发展,高外水压力对水工隧洞的衬砌结

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2014CB046902);国家自然科学基金(51704097)

作者简介:周辉(1972—),男,研究员,博士,主要从事岩土工程相关问题研究。E-mail: hzhou@whrsm.ac.cn

引用本文:周辉,高阳,张传庆,等. 锦屏二级水电站水工隧洞减压孔布置方案优化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):59-65.

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2018.01.009.

构安全性造成很大威胁,如何有效降低衬砌外缘水压力、保证衬砌结构安全性,是建设大型深埋工程必须面对的大问题。

目前,对于外水头较高的隧洞工程,通常采用“注浆+排导”(堵水限排)的设计理念^[1],如圆梁山隧道、青岛胶州湾海底隧道、厦门翔安海底隧道等均采用了堵水限排的处理方案。许多学者^[2-5]基于“堵水限排”的防排水设计理念,对注浆圈合理参数的取值问题进行深入的研究,得出一些有益的结论,为高压富水区以及海底隧道工程防排水设计提供了依据。然而,施工过程中,由于围岩破裂情况和注浆封堵施工质量的不确定性,常常需要在衬砌上打设减压孔^[6-10]。目前针对减压孔作用机理和效果的研究成果鲜有介绍。晏启祥等^[11-12]针对交通隧道中仅拱脚部位设减压孔的泄水式管片衬砌进行数值模拟和模型试验,刘宁等^[13]对设置减压孔后锦屏引水隧洞的衬砌安全性进行分析,这些成果均定性研究了减压孔对衬砌安全性和渗流场的影响。

本文以锦屏二级水电站引水隧洞为研究对象,针对富水条件下水工隧洞衬砌中减压孔的泄压机理进行研究,通过分析泄压效果的影响因素,提出减压孔最优布置方案。

1 工程背景

锦屏二级水电站位于四川省凉山彝族自治州木里、盐源、冕宁三县交界处的雅砻江干流锦屏大河湾上,4条平行布置的引水隧洞横穿锦屏山^[14-15],平均洞线长度约16.7 km,最大埋深达2 525 m,最大实测地应力为1 13.87 MPa,且地处碳酸盐岩溶类地层,溶蚀裂隙发育,地下水丰富,外水压力大,实测天然外水头为800~1 000 m。隧洞采用TBM和钻爆法结合开挖,开挖半径为6.8 m,衬砌厚度为0.8 m,2015年9月工程全面完工。

为了研究高地应力和高外水压下锦屏引水隧洞运行期的安全性,笔者所在科研团队针对衬砌结构进行计算分析,结果表明,不设减压孔时衬砌可承受外水压力约1 MPa,而设计外水压力高达4.2 MPa,在高外水压作用下衬砌结构安全性难以保证。施工中,根据工程经验,在衬砌上布置了减压孔,布置形式如图1所示。从引水隧洞运行结果来看,减压孔的泄压效果显著,保证了衬砌结构的运行安全。但当前,在减压孔的设计理论方面,尚处于空白,更没有相关规范指导,施工中更多的是根据工程经验进行减压孔布置。为此,对减压孔的布置方案开展研究,通过分析减压孔泄压效果的影响因素及敏感性,确定最优布置方案。

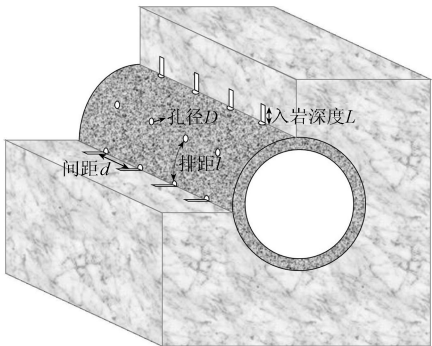


图1 锦屏二级水电站引水隧洞减压孔布置示意图

Fig.1 Drainage hole in the diversion tunnel of the Jinping II Hydropower Station

2 数值计算方案

2.1 数值模型

以锦屏二级水电站引水隧洞为例,采用有限差分软件FLAC^{3D}进行计算分析^[16-17],模型如图2(a)所示,围岩和衬砌均采用六面体实体单元建立,长×宽为100 m×100 m,隧洞开挖半径为6.8 m,衬砌厚度为0.8 m。根据计算方案,在衬砌中采用实体单元等间距布置减压孔,如图2(b)所示。

2.2 边界条件

根据工程经验,模型采用平面应变理论进行计算,模型外围根据地应力和外水压力施加应力和渗流边界条件,如图3所示。由于模型尺寸大于3~5倍开挖洞径,因此,模型两侧采用固定外水头边界,底部为不透水边界,上部为自由边界。

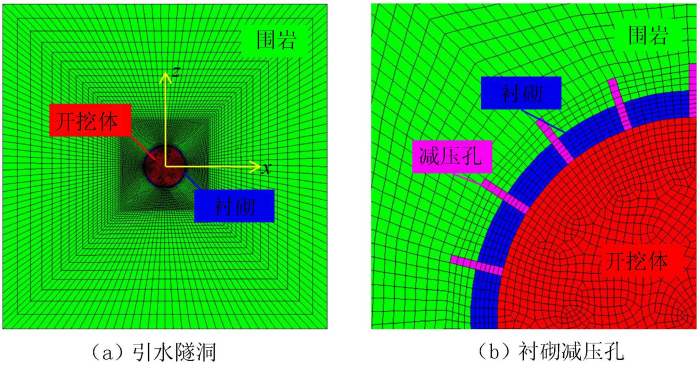


图2 计算模型示意图

Fig.2 Diagram of the simulation model

2.3 计算参数

根据锦屏二级水电站引水隧洞实测数据和课题组研究成果^[18],确定计算荷载如下:地应力 σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 、 τ_{zx} 的取值分别为 41.6 MPa、45.0 MPa、48.6 MPa、-0.4 MPa、3.3 MPa、-4.5 MPa;外水头 P 的取值为 1.86 MPa。计算参数如表 1 所示。

由于渗流场的计算结果与求解时间和过程直接相关,根据实际施工过程,确定隧洞开挖 1 d 后安装衬砌。鉴于本文旨在研究泄压孔的泄压机理和影响因素,进而确定最优布置方案,为衬砌减压孔的设计提供一种理论方法,因此,为节省计算时间,只对衬砌安装 7 d 后的渗流场进行计算。

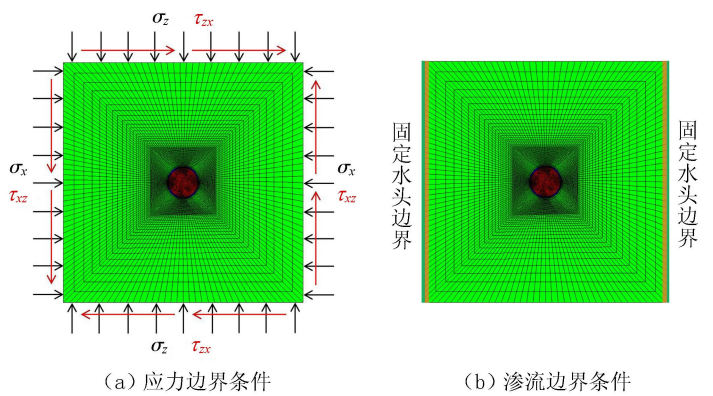


图 3 模型边界条件示意图

Fig.3 Boundary conditions

表 1 计算参数

Table 1 Calculation parameters

部位	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)
围岩	18.9	0.230	15.60	25.8	1.50	2630	1×10 ⁻⁴
衬砌	28.0	0.167	2.73	54.4	1.75	2500	1×10 ⁻⁵

2.4 计算方案

通过分析衬砌外缘水压力的分布特征,对减压孔的泄压机理展开研究,并确定影响减压孔泄压效果的主要因素及敏感性,据此确定最优减压孔布置方案。

2.4.1 减压孔泄压机理

由减压孔的泄压效果(图 4)可以看出:不设减压孔时(图 4 右端),围岩中外水压力等值线呈平行于开挖边界的均匀梯度分布;设置减压孔时(图 4 左端),围岩中外水压力等值线呈波浪形分布,在减压孔中心位置处达到波峰,在相邻 2 个孔的中心达到波谷,意味着外水压力在减压孔处达到最小值,而在相邻减压孔中心位置处达到最大值。

孔隙水在裂隙岩体中的渗流过程中,一部分势能逐步消散,其余的势能逐渐转换为动能,衬砌未安装时孔隙水沿开挖面均匀渗出,形成平行于开挖边界的均匀梯度渗流场,如图 4 右端所示;衬砌安装后,开挖边界不再透水,浅部围岩孔隙水压力略有回升,设置减压孔后形成新的渗流自由面,从而形成图 4 左端所示的波浪状渗流场。

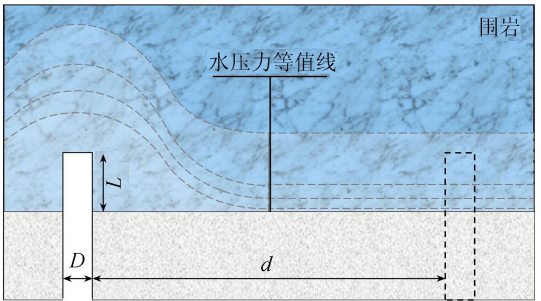


图 4 泄压效果示意图

Fig.4 Sketch of the pressure drainage

2.4.2 泄压效果影响因素及取值范围

通过上述分析,提出影响减压孔泄压效果的主要因素为:减压孔孔径 D 、间距 d 及入岩深度 L 。根据工程经验,减压孔孔径宜小于衬砌钢筋间距。水工隧洞中,衬砌钢筋间距通常为 200 mm,因此,最优减压孔孔径宜小于或等于 0.2 m。鉴于本文针对各因素对泄压效果影响的规律性展开研究,因此确定减压孔孔径取 0.1~0.3 m。

减压孔间距和入岩深度需要根据工程现场开挖尺寸和钻机型号综合确定,减压孔间距不宜过小(影响衬砌安全)或过大(影响泄压效果)。结合锦屏二级水电站引水隧洞衬砌尺寸,确定减压孔间距取值 1.5~3.5 m,入岩深度取值 0.1~0.8 m。

2.4.3 优化目标及方法

对减压孔布置方案进行优化分析,目的在于最大程度上保证衬砌结构的安全性,因此,需要确定与衬砌安全性相关的指标作为优化目标。锦屏二级水电站引水隧洞工程现场监测数据表明,在高地应力和高外水压力作用下,衬砌结构基本处于受压状态,衬砌最大压应力是判断衬砌受力状态的主要指标。因此,本文以

衬砌最大压应力作为优化目标。方法如下:(a)根据不同影响因素的不同水平,建立计算方案;(b)提取渗流场计算结果,评价减压孔泄压效果,并据此分析不同因素的影响程度及敏感性;(c)提取衬砌应力结果,分析应力分布规律,并以衬砌最大压应力为目标进行优化分析。

2.4.4 计算方案

根据正交设计原理,设计 25 组计算方案,取值见表 2。

表 2 各方案减压孔几何参数
Table 2 Geometry parameters of the drainage holes m

方案	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>L</i>	方案	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>L</i>	方案	<i>d</i>	<i>D</i>	<i>L</i>
1	1.5	0.10	0.1	10	2.0	0.30	0.1	19	3.0	0.25	0.2
2	1.5	0.15	0.2	11	2.5	0.10	0.4	20	3.0	0.30	0.4
3	1.5	0.20	0.4	12	2.5	0.15	0.6	21	3.5	0.10	0.8
4	1.5	0.25	0.6	13	2.5	0.20	0.8	22	3.5	0.15	0.1
5	1.5	0.30	0.8	14	2.5	0.25	0.1	23	3.5	0.20	0.2
6	2.0	0.10	0.2	15	2.5	0.30	0.2	24	3.5	0.25	0.4
7	2.0	0.15	0.4	16	3.0	0.10	0.6	25	3.5	0.30	0.6
8	2.0	0.20	0.6	17	3.0	0.15	0.8				
9	2.0	0.25	0.8	18	3.0	0.20	0.1				

3 计算结果分析

数值计算结果表明,布置减压孔可以有效降低衬砌外缘水压力,保证衬砌安全性。相同计算条件下,不设减压孔时衬砌外缘水压力最大为 0.2 MPa,布置减压孔后衬砌外缘最大水压力为 0.1 MPa,后者比前者降低了 50%,说明布置减压孔可以显著提高衬砌的泄压效果,降低衬砌外水压力。

通过分析,选择不同孔隙水压力等值线所包围的面积作为评价减压孔泄压效果的指标。等值线面积越大,表明泄压效果越好。不同孔隙水压力的等值线和衬砌压应力分布如图 5 所示(以方案 9 为例),各方案不同孔隙水压力下等值线面积和衬砌最大压应力的计算结果见表 3。其中,不设减压孔时衬砌最大压应力为 27.29 kPa,并据此求得设置减压孔时衬砌的最大压应力。

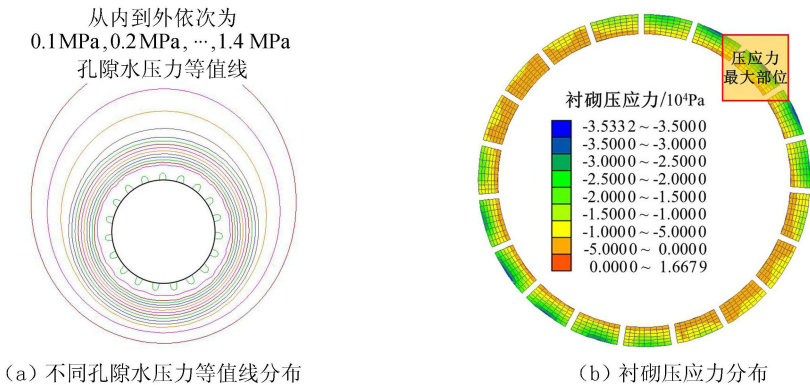


图 5 方案 9 计算结果
Fig.5 Results of the scheme No. 9

3.1 影响因素及敏感性分析

由表 3 计算结果可以看出,0.1~0.3 MPa 孔隙水压力等值线面积的最大变化量为 8.4 m²,变化幅度为 67.7%,孔隙水压力大于 0.3 MPa 时等值线面积最大变化量 0.92 m²,变化幅度仅 1.2%。结果表明,随围岩深入,减压孔的布置方案对泄压效果的影响逐渐减弱,泄压效果对各影响因素的敏感性随围岩深度的增大而逐渐降低。

采用极差分析法,分析不同因素对泄压效果的影响。孔隙水压力等值线面积随各影响因素的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出:(a)随减压孔间距 *d* 增大,减压孔数减少,泄压效果降低;随减压孔入岩深度 *L* 增大,围岩的出水面积增大,泄压效果增强;随减压孔孔径 *D* 增大,有效泄压面积增大,泄压效果增强。(b)随减压孔间距 *d* 和孔径 *D* 增大,曲线斜率绝对值逐渐减小,表明当 *d*>2 m 和 *D*>0.2 m 时,*d* 和 *D* 对泄压效果的影响逐渐减弱,泄压效果对其敏感性逐渐降低;等值线面积随入岩深度 *L* 的变化曲线近似呈线性分

表 3 孔隙水压力 P 等值线面积 A 及衬砌最大压应力 σ 计算结果

Table 3 Contour areas of the pore pressure and the maximum pressure of lining

方 案	A/m^2										最大 压应力 σ/kPa
	$P=0.1\text{ MPa}$	$P=0.2\text{ MPa}$	$P=0.3\text{ MPa}$	$P=0.4\text{ MPa}$	$P=0.5\text{ MPa}$	$P=0.6\text{ MPa}$	$P=0.7\text{ MPa}$	$P=0.8\text{ MPa}$	$P=0.9\text{ MPa}$	$P=1.0\text{ MPa}$	
1	12.8	25.5	39.9	55.7	72.9	91.8	112.7	136.0	162.0	191.4	26.98
2	13.5	25.7	39.9	55.6	72.9	91.8	112.7	136.0	162.0	191.4	28.72
3	15.5	26.9	39.8	55.5	72.7	91.7	112.6	135.8	161.8	191.2	32.58
4	18.2	28.8	40.7	55.2	72.5	91.4	112.3	135.5	161.6	191.0	28.79
5	20.9	31.8	42.6	55.3	72.1	91.0	111.9	135.1	161.1	190.5	12.81
6	13.1	25.6	39.9	55.6	72.9	91.8	112.7	136.0	162.0	191.4	20.90
7	14.5	26.6	39.9	55.6	72.8	91.8	112.7	135.9	161.9	191.3	24.18
8	16.5	27.9	40.6	55.5	72.7	91.6	112.5	135.8	161.8	191.2	30.84
9	18.3	30.0	42.0	55.6	72.5	91.4	112.3	135.6	161.6	191.0	33.19
10	12.7	25.4	39.9	55.6	72.8	91.8	112.7	135.9	161.9	191.3	31.63
11	14.1	26.5	40.0	55.6	72.9	91.8	112.7	135.9	162.0	191.4	22.34
12	15.9	27.6	40.6	55.6	72.8	91.7	112.6	135.9	161.9	191.3	19.18
13	17.4	29.5	41.9	55.9	72.7	91.6	112.5	135.8	161.8	191.2	24.64
14	12.6	25.5	39.9	55.6	72.9	91.8	112.7	135.9	162.0	191.4	21.21
15	13.3	25.6	39.8	55.5	72.8	91.7	112.6	135.8	161.9	191.3	21.00
16	15.1	27.1	40.5	55.7	72.9	91.8	112.7	135.9	162.0	191.4	19.61
17	16.3	28.6	41.5	55.9	72.8	91.7	112.6	135.9	161.9	191.3	23.70
18	12.5	25.5	39.9	55.6	72.9	91.8	112.7	136.0	162.0	191.4	24.98
19	13.1	25.6	39.8	55.6	72.8	91.8	112.7	135.9	161.9	191.3	30.21
20	14.4	26.5	39.8	55.4	72.7	91.6	112.5	135.8	161.8	191.2	26.17
21	15.4	27.9	41.2	55.8	72.9	91.8	112.7	135.9	162.0	191.4	19.41
22	12.4	25.5	39.9	55.7	72.9	91.8	112.7	136.0	162.0	191.4	25.91
23	12.8	25.6	39.9	55.6	72.9	91.8	112.7	136.0	162.0	191.4	21.18
24	13.9	26.3	39.9	55.5	72.8	91.7	112.6	135.9	161.9	191.3	19.99
25	15.3	27.3	40.5	55.5	72.7	91.6	112.5	135.8	161.8	191.2	29.11

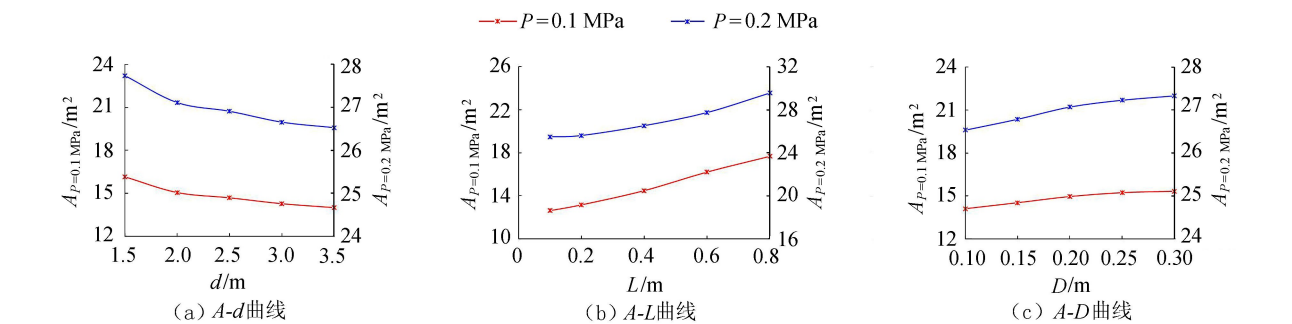


图 6 等值线面积 A 变化曲线

Fig. 6 Curves for the areas of contour lines

布,表明泄压效果对入岩深度的敏感性未降低。

不同孔隙水压力下等值线面积的极差 R 分布如图 7 所示,可以通过对比 R 值分析泄压效果对不同因素的敏感性。

由图 7 可以看出:(a)随着孔隙水压力增大, R 值减小,表明减压孔布置方案对深部围岩孔隙水压力分布的影响较小,而对浅层围岩影响较大。衬砌安装 1 周时,各因素的显著影响范围是: $d=0\sim0.2\text{ MPa}$, $D=0\sim0.2\text{ MPa}$, $L=0\sim0.3\text{ MPa}$ 。(b)对比相同孔隙水压力下的 R 值可以看出:对近场水压力($P=0\sim0.3\text{ MPa}$),各因素对泄压效果的影响程度为: $L>d>D$;对外围水压力,各因素的影响程度为: $L>d>D$ 。可见,泄压效果对减压孔入岩深度的敏感性远大于间距和孔径。

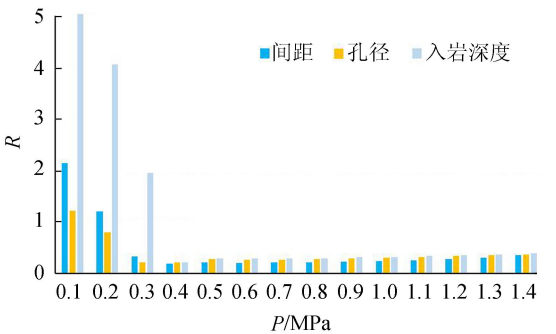


图 7 不同影响因素的极差分析

Fig. 7 Range analysis of different factors

由此可见,设置减压孔可以有效降低衬砌外缘水压力,施工中为降低衬砌外缘水压力,可优先选择增大减压孔入岩深度,其次减小减压孔间距。

3.2 减压孔布置方案优化

对表3中的数据进行极差分析,研究衬砌最大压应力 σ 分布随各因素的变化情况,如图8所示。

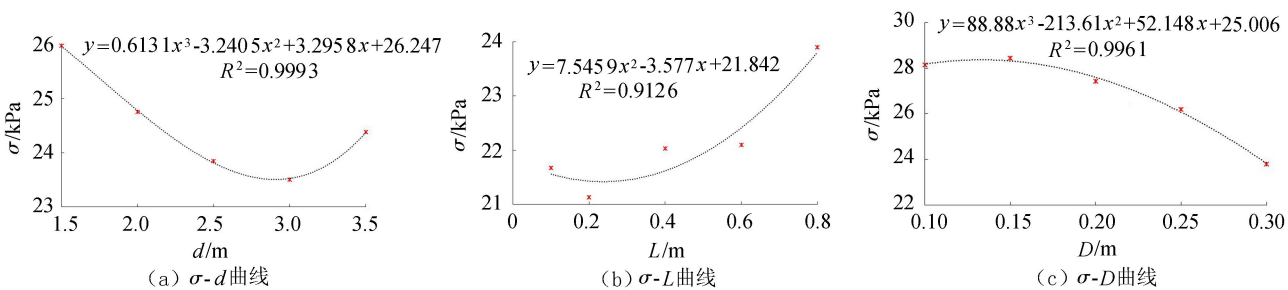


图8 衬砌最大压应力 σ 变化曲线

Fig. 8 Curves for the maximum pressure of lining

由图8可以看出:(a)随减压孔间距增大,衬砌最大压应力先减小、后增大,在 $d=2.86\text{ m}$ 时达到最小值。 d 越小,泄压效果越好,衬砌外缘水压力越低,但削弱了衬砌的力学性能,衬砌应力增大。由图9(a)可知: $d<2.86\text{ m}$ 时,增大间距虽不利于泄压,但对衬砌整体安全性有利; $d>2.86\text{ m}$ 时,增大间距反而不利于衬砌安全。可见,对锦屏二级水电站引水隧洞衬砌而言,减压孔的最优间距为 2.86 m 。(b)随减压孔入岩深度增加,衬砌最大压应力略有减小,然后逐渐增大,在 $L=0.2\text{ m}$ 时达到最小值,如图8(b)所示。增大入岩深度,围岩泄水路径增大,泄压效果随之改善,但减压孔在围岩中延伸,破坏了围岩结构,增大了围岩压力,对锦屏二级水电站引水隧洞衬砌而言,宜选取 $L=0.2\text{ m}$ 。(c)随减压孔孔径增大,泄压效果增强,衬砌最大压应力逐渐降低,可有效保证衬砌的安全性。根据减压孔孔径的取值范围,孔径应小于衬砌内钢筋间距 0.2 m ,因此,对锦屏二级水电站引水隧洞衬砌而言,宜选取 $D=0.2\text{ m}$ 。

4 结 语

通过数值试验,研究了减压孔的泄压机理,利用极差分析法,分别评价减压孔间距、孔径和入岩深度对泄压效果的影响,并以衬砌最大压应力作为优化目标,确定减压孔布置的最优方案。得到如下结论:(a)泄压孔可以有效降低衬砌外缘水压力,保证衬砌结构的安全性。(b)减压孔泄压效果对各因素的敏感性随孔隙水压力的增大而逐渐降低,当 $d>2\text{ m}$ 、 $D>0.2\text{ m}$ 时,继续增大 d 和 D ,泄压效果的改变不再明显。(c)工程中,为有效降低衬砌外缘水压力,宜优先选择增大减压孔入岩深度,其次选择减小减压孔间距,最后选择增大减压孔孔径。(d)减压孔优化方案的确定既要考虑泄压效果,更要保证衬砌结构的安全性,通过优化分析,确定锦屏二级水电站引水隧洞衬砌减压孔最优布置方案为: $d=2.86\text{ m}$ 、 $D=0.2\text{ m}$ 、 $L=0.2\text{ m}$ 。

为了简化计算,本文只对衬砌安装1周后的渗流场进行了分析,对于泄压效应的长期性还需要进一步开展研究。此外,采用的模型只设置了一排减压孔,纵向长度统一采用 3 m ,未考虑减压孔在纵向的间距影响,在后续研究中有待完善。

致谢:本研究得到国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2014CB046902)、武汉市“黄鹤英才(科技)计划”、中国科学院青年创新促进会和中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司的资助,在此表示感谢!

参考文献:

[1] 王建宇, 胡元芳. 对岩石隧道衬砌结构防水问题的讨论[J]. 现代隧道技术, 2001, 38(1): 20-25, 35. (WANG Jianyu, HU Yuanfang. Laboratory test on the lateral earth pressure and influenced zone of retaining structure with stiffened piles[J]. Modern Tunneling Technology, 2001, 38(1): 20-25, 35. (in Chinese))

[2] 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. (JIANG Zhongxin. Interaction between tunnel engineering and water environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 121-127. (in Chinese))

- [3] 张成平,张顶立,王梦恕,等. 高水压富水区隧道限排衬砌注浆圈合理参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(11): 2270-2276. (ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WANG Mengshu, et al. Study on appropriate parameters of grouting circle for tunnels with limiting discharge lining in high water pressure and water-enriched region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(11): 2270-2276. (in Chinese))
- [4] 李宗利,裴向辉,吕从聪,等. 隧道透水性衬砌环渗透系数合理取值与工程措施探讨[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1167-1172. (LI Zongli, PEI Xianghui, LYU Congcong, et al. Reasonable permeability coefficient and engineering measures of concrete lining circle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6): 1167-1172. (in Chinese))
- [5] 王秀英,谭忠盛,李健,等. 隧道工程全包与半包结构防水体系受力特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 654-659. (WANG Xiuying, TAN Zhongsheng, LI Jian, et al. Laboratory tests on mechanical characteristics of fully and partially wrapped waterproof systems for tunnel lining[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 654-659. (in Chinese))
- [6] 李艺珍. 引黄渠道防渗衬砌解决排水问题的有效途径[J]. 人民黄河, 2012, 34(8): 102-104. (LI Yizhen. Effective approaches to solve drainage problem in the Yellow river irrigation channel's waterproof and lining works[J]. Yellow River, 2012, 34(8): 102-104. (in Chinese))
- [7] 管志保,陈连军,张珊. 潘口水电站无压泄洪隧洞衬砌计算[J]. 人民长江, 2012, 43(16): 39-41. (GUAN Zhibao, CHEN Lianjun, ZHANG Shan. Lining calculation for non-pressure section of spillway tunnel of Pankou Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2012, 43(16): 39-41. (in Chinese))
- [8] 郗永波. 基于渗流-应力耦合的导流洞封堵期结构安全性研究[D]. 天津:天津大学, 2011.
- [9] 高新强,仇文革,孔超. 高水压隧道修建过程中渗流场变化规律试验研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(01): 50-58. (GAO Xinqiang, QIU Wenge, KONG Chao. Test study on the variation law of seepage field during the construction process of high water pressure tunnel[J]. China Railway Science, 2013, 34(1): 50-58. (in Chinese))
- [10] 李方华,王志勇. 某隧道进口二衬开裂原因分析与对策[J]. 土工基础, 2016, 30(2): 168-170. (LI Fanghua, WANG Zhiyong. Cracks in the secondary lining of a tunnel portal[J]. Soil Engineering and Foundation, 2016, 30(2): 168-170. (in Chinese))
- [11] 晏启祥,程曦,郑俊,等. 泄水式管片衬砌不同泄水方案的流固耦合分析[J]. 铁道学报, 2012, 34(6): 95-100. (YAN Qixiang, CHENG Xi, ZHENG Jun, et al. Analysis on fluid-structure interaction of drainage segment lining under different drainage schemes[J]. Journal of The China Railway Society, 2012, 34(6): 95-100. (in Chinese))
- [12] 晏启祥,张蒙,程曦. 泄水式管片衬砌壁后水压力分布特性模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊1): 2617-2623. (YAN Qixiang, ZHANG Meng, CHENG Xi. Study of model test for water pressure distribution character behind drainage segment lining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup 1): 2617-2623. (in Chinese))
- [13] 刘宁,房敦敏,张传庆. 深埋引水隧洞复合承载结构运行期安全性评价[J]. 科技通报, 2015, 31(1): 103-107. (LIU Ning, FANG Dunmin, ZHANG Chuanqing. Safety assessment of deep buried diversion tunnel composite bearing structure runtime[J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(1): 103-107. (in Chinese))
- [14] 张传庆,冯夏庭,周辉,等. 深部试验隧洞围岩脆性破坏及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2063-2068. (ZHANG Chuanqing, FENG Xiating, ZHOU Hui, et al. Brittle failure of surrounding rock mass in deep test tunnels and its numerical simulation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2063-2068. (in Chinese))
- [15] 张继勋,任旭华,姜弘道,等. 锦屏二级水电站引水隧洞主要工程地质问题分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(6): 66-70. (ZHANG Jixun, REN Xuhua, JIANG Hongdao, et al. Main geological problems in diversion tunnel construction at Jinping Second Class Waterpower Station[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(6): 66-70. (in Chinese))
- [16] Itasca Consulting Group Inc. FLAC3D (fast lagrangian analysis of continua in 3 dimension) user's manuals version 2.1[G]. Minneapolis, Minnesota: [s. n.], 2002.
- [17] 周辉,高阳,张传庆,等. 考虑围岩衬砌相互作用的钢筋混凝土衬砌数值模拟[J]. 水利学报, 2016, 47(6): 763-771. (ZHOU Hui, GAO Yang, ZHANG Chuanqing, et al. Numerical simulation of reinforced concrete lining considering the interaction with the surrounding rock[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(6): 763-771. (in Chinese))
- [18] ZHANG Chuanqing, FENG Xiating, ZHOU Hui. Estimation of in situ stress along deep tunnels buried in complex geological conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 52: 139-162.