

某抽水蓄能电站施工期地下洞室涌水量预测分析

张帅, 黄勇, 刘雪莹

(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 洞室涌水量的准确预测对于确保抽水蓄能电站地下施工安全意义重大。综合考虑抽水蓄能电站水文地质条件和洞室施工布置情况,选用水均衡法、狭长水平坑道法和数值法3种方法分别对电站区地下洞室涌水量进行预测,并与洞室实测涌水量进行了对比。结果表明:水均衡法、狭长水平坑道法和数值法预测的洞室正常涌水量分别为4 409.58、4 976.78和4 242.24 m³/d,最大涌水量分别为5 167.56、5 463.31和4 763.43 m³/d。数值法预测的涌水量与实测值吻合较好,具有重要的参考价值。在下阶段洞室的施工过程中,数值法预测的涌水量可为管理部门在洞室排水设计等方面起到很好的指导作用。

关键词: 地下洞室;涌水量;水均衡法;狭长水平坑道法;数值法

中图分类号:TV731.6

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)02-0142-05

Water inflow prediction of underground tunnels for a pumped storage power station during the construction period

ZHANG Shuai, HUANG Yong, LIU Xueying

(School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Accurate prediction of the water inflow for the tunnels is of great significance to ensure the underground construction safety of pumped storage power station. Based on the hydro-geological conditions of the pumped storage power station and the layout of the underground tunnels, three methods including the water balance method, the long narrow horizontal tunnel method and the numerical method were used to predict the water inflow of underground tunnels in the power station area, and the simulated results were compared with the measured values. The results showed that the predicted normal water inflow values of water balance method, long narrow horizontal tunnel method and numerical method were 4409.58, 4976.78 and 4242.24 m³/d, respectively, and the largest inflows were 5167.56, 5463.31 and 4763.43 m³/d, respectively. Furthermore, the predicted water inflow using the numerical method agreed well with the measured value, which was an important reference. During the process of next construction stage, water inflow predicted from the numerical method can be a very good guidance for the management departments in design of drainage tunnel.

Key words: underground tunnel; water inflow; water balance method; long narrow horizontal tunnel method; numerical method

地下洞室涌水问题一直是国内外地下工程施工中的重大难题,尤其是水利水电工程,地下洞室多且埋深大,在高水压力作用下很容易突水。涌水量预测是地下隧洞排水方案设计的主要参考依据,涌水量的准确预测对于保证洞室施工进度、安全和节省投资具有重要的意义。涌水量的准确预测以水文地质条件为基础,同时计算方法选取也很重要,目前洞

室涌水量的预测方法主要有水均衡法^[1]、水文地质比拟法^[1]、狭长水平坑道法^[2-3]、大井法^[4]、涌水量降深曲线法^[5]和数值法^[6-9]等,每种方法都具有一定的适用条件。王振宇等^[10]在对比6种隧洞涌水量计算方法优缺点的基础上,选用水均衡法和水文地质比拟法预测了某引水工程不同桩段的洞室涌水量。陈长生等^[11]通过建立某引水工程深埋长隧洞

收稿日期:2016-12-09; 修回日期:2017-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41172204);江苏省“青蓝工程”项目(2016B16073)

作者简介:张帅(1993-),男,安徽宿州人,在读硕士研究生,研究方向为地下水流及污染物运移模拟。

三维数值模型,预测了复杂岩溶区隧洞涌水量大小,并与传统经验公式计算结果对比验证了数值计算方法的可行性。

某抽水蓄能电站厂房区埋深超过200m,地下水水位高且水力坡降大,断层和裂隙较为发育,当洞室开挖揭露这些断层和裂隙时,地下水极易造成涌水灾害。由于水文地质条件复杂,地下水动态资料较少,洞室施工期不宜采用水文地质比拟法和涌水量降深曲线法对地下洞室群进行涌水量预测。大井法主要用于地下厂房的涌水量预测,对施工支洞和引水隧洞预测误差较大。本文在分析抽水蓄能电站工程区水文地质条件的基础上,考虑预测方法对地下洞室群涌水量计算的影响,结合洞室开挖时地下渗流场的改变,选用水均衡法、狭长水平坑道法和数值法分别对洞室施工期的涌水量进行预测,并将预测结果与实测涌水量进行对比,分析了预测误差,以期对抽水蓄能电站下阶段地下施工与防排水方案调整提供相关参考依据。

1 工程概况

某抽水蓄能电站位于江苏省西南部的溧阳市境内,距离溧阳市约32km,主要由上水库、输水系统、地下厂房系统、下水库及地面开关站等建筑物组成。

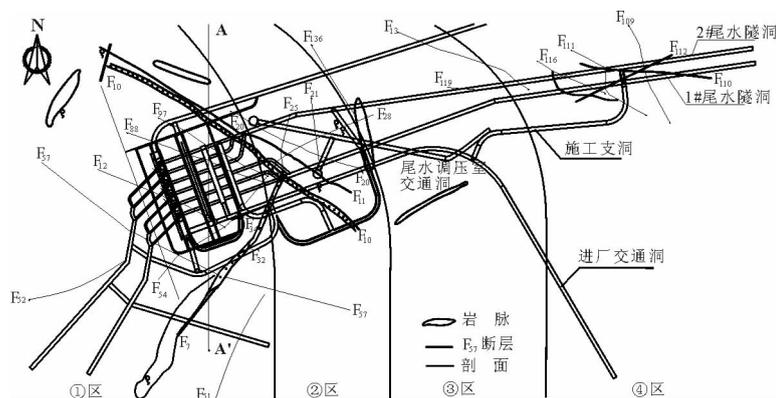


图1 电站区地下洞室平面布置图

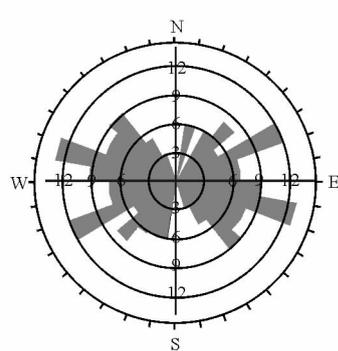


图2 电站区断层统计图

2.2 水文地质条件

依据地层岩性、地质构造和岩体的透水性特征,电站区可分为4个不同的水文地质分区(图1)。第①分区:为 F_{10} 断层和 F_{32} 以西区域(引水系统-厂房区),该区以石英砂岩为主,岩体透水性强;第②分区,为 F_{10} 断层与 F_{136} 断层之间区域,以石英砂岩为主,岩体完整性较好,比①分区的岩体透水性弱;第③分区,为 F_{136} 断层至志留系地层与侏罗系地层交界部位一带,岩体透水性相对较弱;第④分区,为尾

电站区地下洞室(如施工支洞和引水隧洞)具有数量多、埋藏深和规模大的特点,地下洞室主要分为4类:(1)交通洞和施工支洞,包括进厂交通洞、尾水调压室交通洞和①-⑨施工支洞;(2)厂房洞室群,包括主厂房、主变洞、母线洞、厂房排水廊道等;(3)引水系统,包括1#和2#引水隧洞和高压岔支管;(4)尾水系统,包括1#和2#尾水隧洞、尾水调压室、尾水闸门室和尾水岔支洞等,电站区地下洞室平面布置见图1。

2 水文地质条件分析

2.1 地质概况

电站区地层岩性主要为志留系石英砂岩、粉砂岩和泥岩以及侏罗系凝灰岩。地貌类型以构造剥蚀和剥蚀堆积为主,总体呈西高东低的趋势,地表最大高差近450m。断层是区内主要构造形迹,具有发育广、密度大但整体规模小的特点,大部分断层沿走向或倾向方向延伸小于40m,按走向分类主要有NW向、NE向、NNE向及NW向4组,倾角一般大于 50° ,走向分布每 10° 区间内均可见不同发育规模的断层(图2)。规模较大的断层主要有 F_{28} 、 F_{34} 、 F_{51} 、 F_{52} 、 F_{54} 等。节理发育密度大且组数多,间距一般为0.2~0.5m。

水主洞出口部位及下水库一带,主要为侏罗系凝灰岩组成,岩体透水性最弱。以上分析表明,从上水库经地下厂房至下水库,岩体透水性逐渐减弱。

地下水可分为由松散堆积物组成的的孔隙介质水和以志留系茅山组砂岩为主的裂隙介质水两类,并以后者为主。正常条件下,地下水接受大气降水补给和侧向径流补给后,顺地形起伏自西南流向东北,在低洼处以泉的形式排泄,同时以孔隙水和裂隙水的形式侧向排泄。但由于构造上受NNE和NEE方向的

强导水断层(F_{28} 、 F_{34} 、 F_{51} 、 F_{52} 、 F_{54} 等)、裂隙与地下厂房东侧相对阻水的NW向 F_{10} 断层和NNE向 F_{32} 断层综合控制,地下水的排泄条件发生了改变。近乎正交的 F_{10} 断层和 F_{32} 断层阻断了地下水自西南向东北流动去路,地下水在这两条岩脉交汇处的西侧区域汇集、壅高,顺岩脉走向向岩脉与地形交汇的低高程处以泉等形式向冲沟排泄。自引水系统至尾水系统区,降雨补给、径流整体逐渐减弱,排泄趋于缓慢。

3 施工期地下洞室涌水量预测

根据电站区地下洞室的水文地质条件和施工特点,分别采用水均衡法、狭长水平坑道法和数值法预测施工期地下洞室的涌水量。

3.1 水均衡法预测涌水量

水均衡法最早由Thomthwait等人分别于1948年和1957年提出,通过查明研究区内补给、径流、排泄和源汇等关系,建立水均衡方程来算取涌水量。涌水量预测主要考虑非降雨条件和降雨条件两种情况,预

测结果分别对应正常涌水量和最大涌水量。不考虑降雨影响时,即洞室正常涌水量 Q_1 可表示为:

$$Q_1 = \frac{M\mu}{t}(F_1 + 0.33LR) \quad (1)$$

考虑降雨影响时,洞室的涌水量将增加,增加的洞室涌水量 Q_2 可表示为:

$$Q_2 = \frac{\alpha'(P - E)}{1000 \times 30} \times F \quad (2)$$

洞室最大涌水量 Q 为两者之和。即

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3)$$

式(1)~(3)中: M 为需疏干含水层的厚度,m; F_1 为洞室面积, m^2 ; L 为洞室边界周长,m; R 为降落漏斗半径,m; μ 为给水度,无量纲; t 含水层疏干所需时间,a; α' 为有效降雨入渗补给系数; P 为月平均降雨量,mm; E 为月平均蒸发量,mm; F 为降雨入渗补给面积, m^2 。

根据电站的实测数据与监测资料,各水文参数取值见表1。

表1 水均衡法预测的各水文参数取值

参数	H/m	F_1/m^2	L/m	t/a	R/m	F/m^2	μ	α'	E/mm	P/mm
取值	98.96	5.0	3400	5	1400	385000	0.021	0.121	95.33	57.63

其中月平均降雨量与月平均蒸发量分别选取丰、平、枯3种水文年类型监测值计算平均值。将各参数值代入公式计算,洞室正常涌水量为4 409.58 m^3/d ,最大涌水量为5 167.56 m^3/d 。

3.2 狭长水平坑道法预测涌水量

电站区现场钻孔压水试验结果表明,地下洞室以下一定距离内存有相对隔水层(吕荣值小于1 Lu)。因此,可依据地下水动力学方法计算坑道(利用潜水非完整式水平坑道)的涌水量(图3)。狭长水平坑道正常涌水量计算公式为:

$$Q_1 = \frac{KB}{2} \left[\frac{h_1^2}{R_1} + \frac{h_2^2}{R_2} + \frac{2\pi s}{\ln \frac{2T}{\pi b} + \frac{\pi R_1 R_2}{T(R_1 + R_2)}} \right] \quad (4)$$

式中: $h_1 = H_1 - T$; $h_2 = H_2 - T$ 。

计算参数的确定:(1)渗透系数(K),cm/s。基于研究区钻孔压水试验与振荡试验综合确定并取平均值, $K = 5.5 \times 10^{-4}$ cm/s。(2)水平坑道长度(B),m。取地下洞室沿延伸轴线方向上取直后的总长度,为340 m。(3)坑道在补给方向影响宽度(R_1)和排泄方向上影响宽度(R_2),m。根据水文地质资料,取坑道分别至补给边界、排水边界的距

离, $R_1 = R_2 = 200$ m。(4)水平坑道的水位降深(s),m。根据水文试验,取90 m。(5)坑道底部到隔水底板距离(T),m。根据钻孔编录成果资料, T 取20 m。(6)坑道底部宽度(b),m。沿洞室延伸轴线方向设置5个截点,分别选取每个截点处垂直于轴线方向洞室剖面宽度并计算平均值,为2.5 m。(7)两侧边界水位(H_1 和 H_2),m。根据两侧钻孔监测水位确定,均取值为160 m($H_1 = H_2$)。

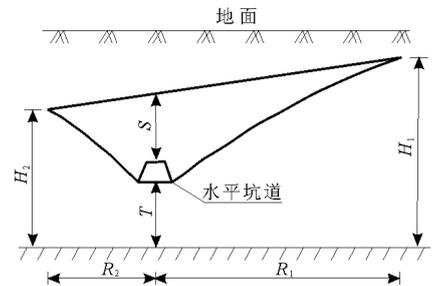


图3 潜水非完整式水平坑道示意图

将以上参数代入式(4),计算得到洞室正常涌水量为4 976.78 m^3/d 。洞室最大涌水量同样考虑降雨入渗补给影响,计算得到洞室最大涌水量为5 463.31 m^3/d 。

3.3 数值法预测涌水量

3.3.1 水文地质概念模型 根据研究区的水文地质条件,共有4个水文地质分区,从①~④分区,岩体的透水性逐渐减弱,涌水量也在逐渐减小。此外,由于受到 F_{10} 断层和 F_{32} 断层阻水作用控制,①区的涌水量较大,实测涌水量统计显示,该区涌水量占总涌水量的约80%以上; F_{10} 断层和 F_{32} 断层严重阻碍了地下水向②-④分区的流动,使得3个区的涌水量占总涌水量约10%~20%。因此,涌水量较大的区域主要集中分布在第①分区,数值计算时主要以该区作为研究对象。对于厂房区A-A'剖面而言(图1),研究区南、北侧边界距离地下洞室较远,受洞室开挖形成的地下水位降落漏斗影响很小,可作为定水头边界处理。根据钻孔资料,在垂向上,按岩体风化程度自上而下主要分为2个带,分别为弱透水带和微透水带,含水层厚度分别为140 m和20 m,渗透系数分别为 5.5×10^{-4} cm/s和 2.5×10^{-5} cm/s。厂房底部岩体完整性较好,作为隔水层处理。模型的地下水位主要依据厂房区设置的6个长观孔资料确定,洞室边界作为内边界,按溢出面边界考虑。

3.3.2 数学模型及求解 通过对电站区水文地质条件概化,选取坐标轴方向与裂隙介质主渗透方向一致,对于非均质各向异性含水层中的地下水流数学模型^[12-14]为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0 & (x, z) \in \Omega \\ H = H_b(x, z) & \text{在 } \Gamma_1 \text{ 上} \\ K_x \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + K_z \frac{\partial H}{\partial z} \cos(n, z) = q_b & \text{在 } \Gamma_2 \text{ 上} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Ω 为计算区域, Γ_1 和 Γ_2 分别为计算区第一、二类边界; H_b 为第一类边界上的已知水头; n 为第二类边界上的外法线方向; q_b 为第二类边界上法向单宽流量,流入为正,流出为负。利用有限元对式(5)进行区域离散,可得如下的矩阵方程:

$$[G]\{H\} = \{F\} \quad (6)$$

式中:[G]为总导水矩阵; $\{H\}$ 为水头矩阵; $\{F\}$ 为流量矩阵。

3.3.3 涌水量计算结果 施工期期间地下洞室较多,各洞室涌水量受施工进度的影响也较大。数值计算时,先计算出剖面揭露的各洞室的单位涌水量,然后将整个洞室的涌水量相加得到洞室总涌水量。A-A'剖面揭露的洞室主要有:①施工支洞、②施工

支洞、⑧施工支洞、进厂交通洞、主变洞、尾水支洞和厂房排水廊道等(图4)。

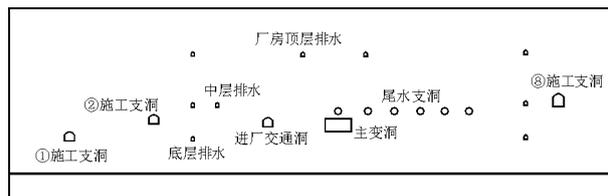


图4 洞室A-A'剖面图

剖面的长度为930 m,高度为160 m,顶部标高为70 m,底面标高为-90 m。计算区采用Geostudio软件的Seepage模块并应用有限元法对区域进行三角形离散,A-A'剖面剖分为19950个节点,39199个单元。洞室主要施工期为2012-2014年,模型计算起始时间设为2012年1月,终止时间为2014年12月。为计算方便,洞室涌水量数值求解时计算尺度取为1年(365 d),即分别计算2012年、2013年和2014年整年的洞室涌水量,然后将对应年份的涌水量平均到每天作为预测涌水量。根据降雨和河水位资料,取平水期和丰水期两个计算方案,施工时,地下水位降至洞室底板高程,分别预测洞室正常涌水量和最大涌水量。通过模型运行计算,2012-2014年洞室正常涌水量分别为4135.64、4374.44、4216.65 m³/d,平均值为4242.24 m³/d;最大涌水量分别为4894.34、4612.44、4783.64 m³/d,平均值为4763.47 m³/d。

4 预测结果分析

分别采用水均衡法、狭长水平坑道法和数值法3种方法预测了洞室施工期间的涌水量,各种方法预测的结果存有一定的差别,本文对3种方法预测的涌水量与实测涌水量进行了对比(表2)。从表2可以看出,狭长水平坑道法预测结果最大,水均衡法预测结果次之,数值法预测结果最小。数值法预测的涌水量结果与实测值较为接近,相对误差最小,预测精度相对较高。水均衡法、狭长水平坑道法和数值法在预测施工期洞室涌水量上存在明显的差异,主要原因是:

(1)水均衡法预测洞室涌水量以区域长期的水文监测资料为基础,仅将降雨量与蒸发量看作影响区域水文平衡的主要因素,而忽略了区域系统内部水力联系对平衡的影响。对于丘陵、山区等复杂地区的平均降雨量与平均蒸发量的计算,现有方法计算误差一般相对较大,很难准确反映真实情况。

(2)狭长水平坑道法预测时将洞室取直看作狭长坑道,这本身作为一种类比、概化与真实洞室存有差别,计算过程中对结果影响较大的渗透系数、影响宽度等参数一般都是基于抽(放)水等水文试验取得,往往受试验时间和降深限制,不具有普适性。

(3)数值法是通过建立计算区水文地质概念模型与数学模型来预测洞室涌水量,该方法充分考虑了计算区的水文地质条件、边界特征、裂隙介质的非均质性和洞室布置等影响因素,计算结果与实测值吻合较好。

表2 施工期洞室涌水量不同计算方法计算结果与实测值对比

预测方法	计算项目	计算施工期年份			计算误差	
		2012	2013	2014	平均差值	平均相对误差/%
水均衡法	正常涌水量		4409.58		204.19	4.80
	最大涌水量		5167.56		234.36	4.80
狭长水平坑道法	正常涌水量		4976.78		671.49	16.00
	最大涌水量		5463.31		530.11	10.70
数值法	正常涌水量	4135.64	4374.44	4216.65	36.95	0.80
	最大涌水量	4894.34	4612.44	4783.64	169.73	3.40
实测值	正常涌水量		4205.29			
	最大涌水量		4933.20			

5 结论与建议

(1)水均衡法、狭长水平坑道法和数值法预测的洞室正常涌水量分别为4 409.58、4 976.78和4 242.24 m³/d,最大涌水量分别为5 167.56、5 463.31和4 763.47 m³/d。经对比,数值法预测的涌水量与实测值吻合较好,具有重要的参考价值。在下阶段洞室施工过程中,数值法预测的涌水量可为管理部门在洞室排水设计等方面起到很好的指导作用。

(2)与实测涌水量相比,水均衡法和狭长水平坑道法计算误差较大,数值法计算误差较小。主要是因为水均衡法和狭长水平坑道法适用于含水层等厚、均质各向同性且水文地质条件简单的情况,而数值法能够充分刻画研究区复杂的边界条件、含水层水文地质结构和水文地质条件,适用性更广。

(3)抽水蓄能电站地下洞室一般深埋于裂隙岩体中,水文地质条件复杂。洞室开挖过程中要加强地下水的沿途监测并及时作好渗、漏、滴水等部位的灌浆封堵工作,防止突水灾害发生。在施工期进行涌水量预测时,建议优先选用数值方法,同时辅以其它传统方法,相互验证,确保为施工方案的动态调整提供精确的数据资料参考。

参考文献:

[1] 王建秀,朱合华,叶为民. 隧道涌水量的预测及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(7):1150-1153.

[2] 李鹏飞,张顶立,周 烨. 隧道涌水量的预测方法及影响因素研究[J]. 北京交通大学学报,2010,34(4):11-15.

[3] 戴岩柯,崔世新,张 坤. 水均衡法和数值模拟法在矿坑深部涌水量预测中的比较——以西石门铁矿为例[J]. 地下水,2010,32(1):24-26.

[4] 华解明. “大井法”预测矿井涌水量问题探讨[J]. 中国煤炭地质,2009,21(6):45-47.

[5] 王 媛,金 华,李冬田. 裂隙岩体深埋长隧洞断裂控水模型及突、涌水量多因素综合预测[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(8):1567-1573.

[6] 刘 杰,黄 勇. 某抽水蓄能电站地下厂房涌水量预测[J]. 勘察科学技术,2015,33(4):39-41.

[7] 熊长林,徐晓星,高应荣,等. 江西井冈山鹅岭隧道的工程地质调查与涌水量预测[J]. 高校地质学报,2013,19(1):78-85.

[8] 田海涛,董益华,王延辉. 隧道涌水量预测的研究[J]. 水利与建筑工程学报,2007,5(3):75-77.

[9] 姚丽利,胡立堂. 利用FEFLOW预测隧道涌水量的一个案例研究[J]. 工程勘察,2015,43(11):39-43.

[10] 王振宇,陈银鲁,刘国华,等. 隧道涌水量预测计算方法研究[J]. 水利水电技术,2009,40(7):41-44.

[11] 陈长生,周 云,王家祥,等. 复杂岩溶区深埋长隧洞涌水量预测分析[J]. 人民长江,2015,46(10):29-33.

[12] 晁江琴,徐世光,范柱国,等. 云南省某岩溶隧洞涌水量预测[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(6):167-170.

[13] 陈 阳,周志芳,黄 勇,等. 黑麋峰抽水蓄能电站岔管区渗控效果评价[J]. 水力发电,2014,40(7):42-44.

[14] 陈崇希,林 敏. 地下水动力学[M]. 武汉:中国地质大学出版社,2011.