

地下厂房洞群围岩渗流场有限元分析*

王 锋, 朱岳明

(河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘 要 运用固定网格结点虚流量法和排水子结构技术以排水孔开关器概念, 对三板溪水电站地下厂房洞群围岩渗流场进行了三维仿真模拟, 解决了由于多样性的地层结构、特殊的渗控措施和复杂的厂房结构而带来的诸多难题, 成功地求解了三板溪地下厂房区的复杂渗流场。充分证明排水孔结构技术对求解精度提高的优越性。

关键词 地下厂房; 渗流场; 有限单元法; 排水子结构; 排水孔开关器

中图分类号 :TU378

文献标识码 :A

文章编号 :1671-532X(2002)03-0049-02

三板溪水电站是一座以发电为主, 兼有防洪、航运、养殖、旅游等综合效益的大型水利工程。坝址位于贵州省锦屏县境内, 是沅水干流 15 个梯级电站中唯一具有多年调节性能的龙头水电站, 可为下游电站提供较大的补偿库容。水库枢纽布置采用混凝土面板堆石坝、石岸地下厂房的布置方案, 地下式水电站建筑物环绕右坝头布置, 主要由岸塔式进水口、引水发电隧洞、地下主厂房、主变洞及尾水隧洞等组成。地下厂房所在的右岩山体雄厚, 坡度 $45^\circ \sim 60^\circ$, 山顶高程在 600 m 以上, 洞室垂直埋深 220 ~ 270 m, 水平埋深约 200 ~ 380 m。地层呈单斜构造, 岩层产状:走向 $N30^\circ \sim 45^\circ E$, 倾角 $SE35^\circ \sim 45^\circ$ 。地下厂房岩性主要为板溪群清水江组第 1 段第 8 层厚层至巨厚层凝灰质粉细砂岩。厂区附近规模较大的断层有 F_{56} 、 F_{69} 、 F_{100} 和 F_{69} 等, 破碎带宽为 0.25 ~ 1.2 m。

三板溪地下厂房区渗流场存在着以下一些特征:地层结构复杂;厂区人为渗控措施的复杂;以及计算域中的边界条件,特别是密集排水孔内部边界条件的复杂性。鉴于三板溪水电站地下厂房厂区岩体渗流特性以及洞室群厂区厂外和厂内防参与排水渗控设施方案的复杂性,分别就整个右坝肩厂区岩体计算域进行了三维有限元的计算分析,综合评估了厂区渗流场的主要渗流特性、以及影响渗流场分布主要因素的影响程度。

1 渗流场求解基本理论^[1~3]

1.1 固定网格结点虚流量法原理

根据变分原理,式(1)和式(2)分别为三维达西渗流场问题的求解泛函和有限单元法代数方程。

$$\Pi(H) = \frac{1}{2} \int_{\Omega_1} k_{ij} H_{,i} H_{,j} d\Omega \quad (1)$$

$$[K_1] \{H_1\} = \{Q_1\} \quad (2)$$

其中 $[K_1]$ 、 $\{H_1\}$ 和 $\{Q_1\}$ 分别为计算域 Ω_1 的总传导矩阵、未知结点水头列阵和结点等效流量列阵。由于在实际工程中,自由面的位置、逸出面的大小及实际渗流域的大小事先未知,需通过式(3)的迭代计算才能求得渗流场的解。

$$[K] \{H\} = \{Q\} - \{Q_2\} + \{\Delta Q\} \quad (3)$$

其中 $[K]$ 、 $\{H\}$ 和 $\{Q\}$ 分别为计算域 $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$ (Ω_1 、 Ω_2 分别为位于渗流自由面以上的渗流实域、虚域)时的总传导矩阵、结点水头列阵和结点等效流量列阵; $\{Q_2\}$ 为渗流虚域的结点等效流量列阵; $\{\Delta Q\} = [K_2] \{H\}$, 为渗流虚域中虚单元和过度单元所贡献的结点虚流量列阵。

1.2 排水子结构技术

排水孔的布置一般是地下厂房厂区渗流场中渗控措施的核心,因此地下厂房渗流场计算的关键就在于对密集排水孔的精细模拟。文献[2]于

* 收稿日期:2002-05-11

作者简介:王 锋(1977-),男,江苏盐城市人,河海大学硕士研究生。

1992 年率先提出排水孔排水子结构的概念,文献[1]在此基础上提出的改进排水子结构技术率先在理论和算法上彻底解决了一直困扰渗流场求解的“排水子问题”,且至今仍是解决这一问题唯一严密的技术。

1.3 排水孔开关器的概念

如图 1 所示,在地下厂房的排水幕中,按排水工作方式的不同,排水孔可分为逸流型和溢流型两种形式。(1)沿着排水廊道顶板向上布置的排水孔,称为逸流型排水孔,对于这一类排水孔,渗流自由面以上部分,排水孔壁面不排水,这一孔段不起排水降压作用,以下部分的排水孔壁面为实际渗流逸出面,起排水降压的作用,结点水头等于该结点位置高程。(2)沿着排水廊道底板向下布置的排水孔,称为溢流型排水孔,对于这一类排水孔,当孔口高程低于渗流自由面时,整个排水孔壁面全部排水降压边界,且孔周面上任何一点的结点水头等于孔口高程,反之,当排水孔孔口高于渗流自由面时,整个排水孔不排水不起任何排水降压的作用。

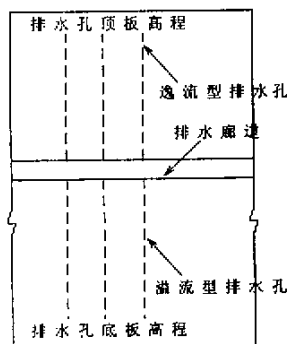


图 1 排水孔的类型

Fig.1 The types of draining holes

对于溢流型排水孔,由于事先无法确定每个排水孔的孔口高程和渗流自由面的相对位置关系,事先也就无法知道排水孔是否处在排水状态,需要通过渗流场的迭代求解来逐步甄别、确认,为此作者引进排水孔开关器的概念。求解前在每个溢流型排水孔孔口虚构一个数学开关器,在整个计算域渗流场求解、逸出面边界大小、渗流自由面迭代计算过程中,先假定所有排水孔都处在工作状态,再据中间解逐个地算出每个溢流型排水孔孔口的渗流量,若该流量为渗出,则事先排水孔处在工作的假定为正确,若为入渗流量,则按渗流场的原本物理意义,该排水孔孔口实为高于渗流自由面,该排水孔不排水。当排水孔工作时,开关器

打开,孔壁面为一个等水头面;当排水孔不工作时,开关器关闭,此时孔口高程高于其邻域内的自由面,排水孔被自由面穿过。

2 计算模型与网格剖分

根据三板溪水电站右岸地下厂房建筑物分布情况、岩层水文地质特性、地形地貌,以及渗流场分析研究的要求,计算模型为厂区渗流场计算域的左侧取至河道中心线,将河道中心线以右区域为研究区域;右侧取至山体地质 AB 点为研究域的右边界,距 1 号机组中心点 400 多 m;上游取至 1 号机组中心点上游 500 m 处;下游取至 1 号机组中心点下游 400 m 处;铅直向上取至原地面,部分地区取至 500 m 高程处;铅直向下取至 100 m 高程处。

计算中用空间六面体 8 结点等参元为主对计算域进行剖分,不计排水子结构内部单元结点时,网格共有 15142 个单元和 18083 个结点。图 2 为计算所用的单元网格图。

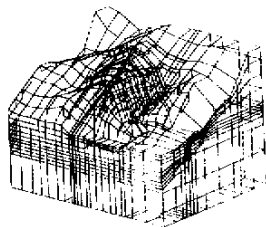


图 2 单元网格

Fig.2 The mesh of elements

3 计算工况及计算结果分析

3.1 计算工况

计算模型考虑的主要工况包括(1)施工期工况(2)工程竣工后正常蓄水位运行期工况(3)比较工况 1(4)比较工况 2(5)比较工况 3。具体内容见表 1。

3.2 计算结果分析

3.2.1 厂区渗流场特点

三板溪地下厂房系统位于河道右岸,厂区地下水来源为库水和山坡地下水,并且以山坡地下水为主控水位。厂区地下水由山坡地下水流向河道,包括流向上游库区和下游河道,部分地区流向山沟,如厂区下游右岸山坡处有一深沟,是地下水高位逸出处,图 3 中清晰地表明这一点。图 3~6 分别为工况 2~5 下一号引水隧洞剖面的等水头线图。

表 1 三板溪地下厂房渗流场计算工况

Table 1 The calculation cases of the seepage field

序号	工况	上游水位/m	下游水位/m	备 注
1	施工期工况	318.00	318.00	洞室开挖完成,无渗控措施
2	正常运行工况	476.24	337.39	设计洪水水位
3	比较工况 1	476.24	337.39	灌浆帷幕完全失效
4	比较工况 2	476.24	337.39	排水幕完全失效
5	比较工况 3	476.24	337.39	排水幕底部 310 m 以下排水孔失效

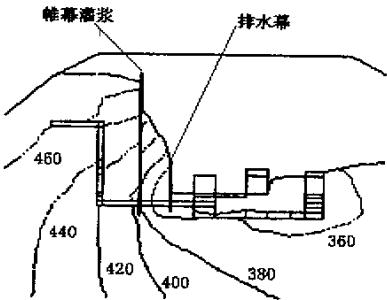


图 3 1 号引水隧洞剖面等水头线图(工况 2)
Fig.3 The isoline of No.1 water channel in case 2

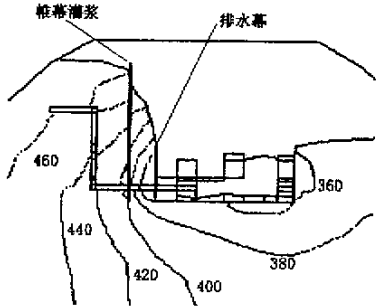


图 4 1 号引水隧洞剖面等水头线图(工况 3)
Fig.4 The isoline of No.1 water channel in case 3

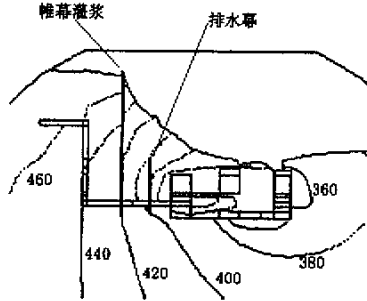


图 5 1 号引水隧洞剖面等水头线图(工况 4)
Fig.5 The isoline of No.1 water channel in case 4

在正常运行工况下,厂区的渗控措施包括灌浆帷幕、厂外排水幕和洞室内排水,从图 3 中可以看到,在灌浆帷幕附近有大量等水头线密集,表明该处地下水头变化急聚,而在主变室之后,地下水

万方数据

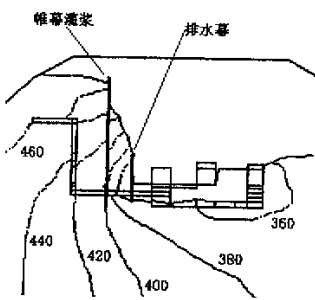


图 6 1 号引水隧洞剖面等水头线图(工况 5)
Fig.6 The isoline of No.1 water channel in case 5

位变得平缓,出现缓变区,在厂房、主变室区出现很大范围的疏干区,保证厂房和主变室良好的工作环境,给厂房和主变室的岩体稳定提供有利条件。

在工况 3 中,即比较工况 1(灌浆帷幕全部失效),在图 4 中,等水头线沿灌浆帷幕近似直线消失,等水头线分布变得稍匀称,这一切均反映灌浆帷幕的消失,阻水带的消失。在与工况 2 比较时,体现帷幕灌浆的止水作用。

在工况 4 中,即比较工况 2(厂区排水幕完全失效),在图 5 中,等水头线分布匀称和地下水面线变得平缓,均说明厂外排水幕失效后厂区渗流场变化很大,反过来也说明厂外排水幕渗控效果很大。厂房基本上淹没在地下水面以下,主变室靠山坡一侧也有很大一部分淹没在地下水面之下。因而,厂外排水幕绝对不能失效,一旦发现局部失效,必须采取补救措施,以免出现险情。

在工况 5 中,即比较工况 3(排水幕底部 310 m 以下排水孔失效),在图 6 中可看出,380 m 等水头线位置比工况 2 中向下游移了一点,400 m 等水头线位置也向下游移了一点,说明排水幕底部失效的影响是比较明显的。

在施工期工况中,库区没有蓄水,河道中均为天然河道水位,厂区没有灌浆帷幕和厂外排水幕。厂区洞室具有一定的渗漏功能,但厂房和主变室

绝大部分仍在地下水面以下,这会给施工带来一定的麻烦,下游山沟的渗水逸出就更为明显。

3.2.2 洞室外水压力分析

厂房区渗流场计算重要目的之一是掌握厂房系统中引水隧洞、尾水管、尾水支洞、尾水主洞以及厂房、主变室等洞室的周壁外水压力,为结构计算提供外荷载依据,也是工程设计人员分别关注的事。

由于引水隧洞其所处的位置和其结构特点,其外水压力显得特别重要,因此我们以引水隧洞为例进行分析,引水隧洞剖面上外水压力分布很有规律。一般情况下,引水隧洞的底中右侧(靠山坡一侧)的外水压力最大,引水隧洞的顶部左侧(靠河道一侧)外水压力最小,引水隧洞底部水压力大于顶部水压力。首先对于4根引水隧洞分别给出三个典型剖面,其中1号剖面位置位于灌浆帷幕上游,离灌浆帷幕35 m,靠近引水隧洞下部拐弯处,应该说该处是外水压力最大的地方;2号剖面位置位于灌浆帷幕和厂外排水幕中间;3号剖面位置位于厂外排水幕之后,厂房之前,紧贴厂房处。由表2可知,1号位置外水压力倍比值接近于1,最大不超过1.2,说明引水隧洞在灌浆帷幕上游部位外水压力分布比较均匀。2号位置外水压力倍比值较大,最大的达1.721,也就说明引水隧洞在灌浆帷幕后排水幕前这一段外水压力分布已经不均匀,差异变得较大。3号位置由于排水幕和厂房上游侧排共同作用,引水隧洞在该处顶部外水压力很小,几乎为零,而引水隧洞底部外水压力虽然较小,但远大于顶部,外水压力分布非常不均匀。表2为同一引水隧洞壁最大水压力与最小水压力倍比统计。

3.2.3 洞室及排水幕渗流量分析

渗流量大小主要取决于渗流场渗透坡降、渗流场材料的透水性以及排渗面积。由于排渗面的位置不同,周边地下水位不同,渗流量就会大不一样。三板溪厂区主要洞室和排水幕各种工况计算结果见于表3。

参考文献:

[1] 朱岳明.改进排水子结构法求解地下厂房洞室群区的复杂渗流场[J].水利学报,1996(9):79-85.
[2] 王 镭,刘 中,张有天.有排水孔幕的渗流场分析[J].水利学报,1992(4):15-20.
[3] 朱岳明,张燎年.渗流场求解的改进排水结构法[J].岩土工程学报,1997(2):69-76.

表2 同一引水隧洞壁最大水压力与最小水压力倍比统计

Table 2 The ratio between maximum water stress and minimum water stress of the same water channel					
工况	位置	1号隧洞	2号隧洞	3号隧洞	4号隧洞
1	1号位置	1.187	1.169	1.17	1.17
1	2号位置	1.226	1.235	1.246	1.283
2	1号位置	1.178	1.121	1.104	1.181
2	2号位置	1.334	1.397	1.465	1.721

表3 主要洞室和排水幕渗流量计算成果

Table 3 The calculation rusult of seepage of underground plant of Sanbanxi					
	工况1	工况2	工况3	工况4	工况5
厂 房	3334.65	789.50	1046.19	4306.86	972.37
主变洞	805.99	428.86	600.26	1122.89	483.84
排水幕	0.00	9038.22	10700.18	0.00	8296.37
尾水支洞	1776.41	727.61	909.81	1174.63	790.57
尾水主洞(部分)	1314.88	639.14	811.35	890.69	671.21
调压室	708.41	792.22	975.78	1108.76	826.12
总 和	7940.34	12414.95	15043.57	8603.83	12040.48

4 结 论

(1)通过对复杂地下厂房渗流场问题的三维有限分析,再一次证明了引入排水结构技术及排水孔开关器概念对实际工程求解的必要性和重要性。它不但可以很好地适应计算域大、岩性及边界条件复杂等特点,而且可以精细模拟众多排水孔等防渗工程措施,并有效控制计算规模,从而取得科学精确的计算结果。

(2)灌浆帷幕及排水幕等渗控措施的设计方案和工程效果应紧密结合现场实际地质条件,在运行期,应特别重视厂外排水幕的工作情况,严密监视其效果。

(3)厂区的渗控方案以“厂外堵排为主,厂内排水为辅”为原则,采用前堵后排的渗控措施,即灌浆帷幕、厂外排水幕和洞室内排水3项措施,有效地控制了厂区地下水,使厂区的渗控效果达到了预期的目的。

The FEM Analysis of Seepage Field of Underground Plant and Its Cavities

WANG Feng ,ZHU Yue-ming

(College of Water Conservancy & Hydropower Engineering ,Hohai University , Jiangsu Nanjing 210098 ,China)

Abstract :In this paper ,the author imitate 3D model of underground plant of Sanbanxi and its cavities with the method of immobile mesh & virtual flux of node. Several difficulties caused by the variety of stratum structure , the special seepage-controlling measures and the complex plant structure are solved. The complex seepage field of underground plant of Sanbanxi is computed successfully. The advantage of improving on calculation precision by draining substructure is fully certificated.

Keywords :Underground plant ; Seepage field ; FEM ; Draining substructure ; Draining holes controller

(上接第 40 页)

The Application of Tribology Fault Diagnostic Technigue to AUTO Engine

SI Chuan-sheng ,CHEN Ming-hua

(Thraffic Engineering Department of Huaiyin Institute of Technology ,Jiangsu Huaiyin 223001 ,China)

Abstract :The article apply the tribology fault diagnostic technigne to the spectral analysis and measurements of physical and chemical properties which are made respectively for worn-out particles and lubricand in the lubricating system of the AUTO engine , The malfunction blow-by to the engine crankcase and its actual Position can be diagnosed , It aims to improve the reliability of the engine.

Keywords :Engine ; Tribology ; Diagnostic Technique