

二滩水电站基础三维渗流场分析

张燎军, 朱岳明

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 论述了基于固定网格结点虚流量法的改进排水子结构技术的算法理论和实施方法,通过对二滩水电站基础岩体复杂排水系统的精细模拟,详细分析了二滩坝基和坝后抗力体、水垫塘、地下厂房的渗流状态和渗控效果,对二滩枢纽基础的渗控控制措施作出评价。

关键词 二滩水电站 坝基 排水子结构 渗流场 渗控措施

中图分类号 TV698 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2001)01-0059-06

二滩水电站位于四川省西南部的雅砻江下游,系雅砻江开发的第一期工程,枢纽位于四川省米易县境内,距河口 33 km,距攀枝花市约 40 km. 成昆铁路桐子林车站位于坝址下游 17 km. 二滩水电站是以发电为主的综合利用水利工程,控制流域面积约为 116 400 km²,正常蓄水位 1 200 m,总库容 58 亿 m³,有效库容 33.7 亿 m³,属调节水库,总装机 330 × 10⁴ kW,年发电量 170 亿 kW·h. 枢纽建筑物主要由双曲拱坝、左岸地下发电系统、右岸泄洪隧洞以及左岸过木机道等组成. 河床坝基高程 965 m,坝顶高程 1 205 m.

坝址处于高山峡谷地段,峡谷近南北向,坝址区岩性为玄武岩和正长岩,两岸谷坡陡峻,临江坡高 300 ~ 400 m. 河谷呈不对称的‘V’形,左岸谷坡 25° ~ 45°,右岸谷坡 30° ~ 45°,雅砻江以 S60°E 流经坝区,正常蓄水位(▽1 200 m)时,河谷宽为 600 ~ 700 m. 左岸中滩至三滩有多条冲沟发育,右岸二滩沟以上地形完整性稍差. 由于岩体含水率及透水性不均一,导致地下水位变化较大,浅部卸荷岩带,岩体松弛,透水性较强,风化相对较弱的岩体,透水性不均一,随深度增加,透水性很快减小. 坝区岩体渗透性总体呈随深度增加由强渐弱的垂直分带特征.

二滩拱坝是我国目前已建成的最高双曲拱坝,大坝建成并在水库蓄水后,在库水位及各种渗控措施作用下,坝基岩体的渗流状态发生了很大变化,为了了解大坝基础岩体的渗流状态和各种渗控措施的作用,笔者进行了二滩水电站基础岩体的三维渗流场有限元分析,并考虑了部分排水渗控措施有效或失效的情况,以及山体地下水的影响等,对二滩水电站基础的渗控效果作出评价.

1 计算模型和计算方法

1.1 计算理论

据广义达西定理,各向异性连续介质中的三维稳定渗流的控制方程和边界条件为

$$\left\{ \begin{array}{ll} (k_{ij}\varphi_{,j})_{,i} = 0 & x_i \in \Omega_1 \\ \varphi \geq x_3 & x_i \in \Omega_1 \\ \varphi < x_3 & x_i \in \Omega_2 \\ \varphi = \varphi_0 & x_i \in \Gamma_1 \\ -k_{ij}\varphi_{,j}n_i = q_0 & x_i \in \Gamma_2 \\ k_{ij}\varphi_{,j}n_i = 0 \text{ 和 } \varphi = x_3 & x_i \in \Gamma_3 \\ k_{ij}\varphi_{,j}n_i \leq 0 \text{ 和 } \varphi = x_3 & x_i \in \Gamma_4 \end{array} \right. \quad (1)$$

其中

$$\varphi = x_3 + p/\gamma_w$$

式中: Ω_1 ——渗流实域; Ω_2 ——渗流虚域; x_1, x_2, x_3 ——直角坐标系; $\varphi, p/\gamma_w$ ——位置水头及压力水头;

n_i ——界面外法向方向余弦; k_{ij} ——二阶渗透张量; Γ_1 ——已知水头边界; φ_0 ——已知水头; Γ_2 ——已知流量边界; q_0 ——已知流量(不透水边界时, $q_0=0$); Γ_3 ——渗流自由面; Γ_4 ——渗流溢出面。

据文献[1],用固定网格的结点虚流量法可得上述方程组的有限元支配方程为

$$K\varphi = Q - Q_2 + \Delta Q \quad (2)$$

式中: K, φ, Q ——计算域的总传导矩阵、未知结点水头列阵和结点等效流量列阵; Q_2 ——已知结点水头对虚域中未知水头的等效流量列阵; ΔQ ——为渗流虚域中虚单元所贡献的结点虚流量列阵,其物理及代数意义是平衡式(2)左端项中相应的结点虚流量对解的影响。

1.2 排水子结构技术

排水幕在渗流场中直接将地下水导排至渗流域外,对水头分布影响极大,在工程渗控设计措施中起到关键作用。一个排水孔的内边界有可能是渗流溢出面,也有可能是已知的水头边界面。当自由面不穿过排水孔时,排水孔的内边界为确定的,容易进行求解。当自由面穿过排水孔时,由于自由面以上为渗流虚域,在结点虚流量法中有 $\varphi < Z$;自由面以下为渗流实域,有 $\varphi \geq Z$ 。而在对方程组的迭代求解过程中,随自由面位置的调整,排水孔的内边界的边界条件将作相应调整。为了能准确地模拟排水孔的排水效应,笔者采用了排水子结构技术。这种方法是将一个或数个排水孔看成一个子结构,围绕每一排水孔由密至疏划分网格,通过出口结点将子结构内部和外部的渗流场相关联。其特点是可以准确、全面、真实地反映排水孔的孔径、孔距和孔壁边界条件,从而准确、有效地反映整个渗流场的排水效应。在对二滩坝基排水幕进行模拟时,视不同情况分别采用的子结构模型有3个孔、5个孔和7个孔三种形式。图1为5个孔的子结构网格剖分平面图。

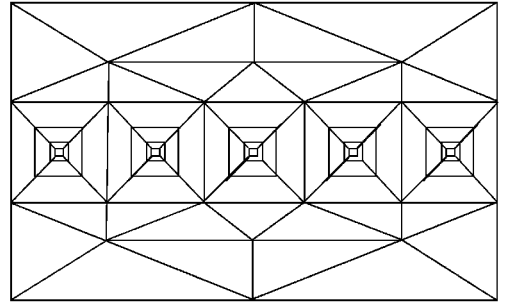


图1 子结构平面网格

Fig.1 The plane mesh of a substructure

首先,考虑自由面不穿过子结构的情况。若子结构全位于渗流虚域,则按结点虚流量法求解时,整个子结构都作为虚单元被丢去;若全位于渗流实域,则设子结构的有限元方程组可分解为

$$\begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ic} \\ k_{ci} & k_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_i \\ q_c \end{Bmatrix} \quad (3)$$

按静态凝聚法则可得:

$$\varphi_i = k_{ii}^{-1}(q_i - k_{ic}\varphi_c) \quad (4)$$

$$k'_{cc}\varphi_c = q'_c \quad (5)$$

$$k'_{cc} = k_{cc} - k_{ci}k_{ii}^{-1}k_{ic} \quad (6)$$

$$q'_c = q_c - k_{ci}k_{ii}^{-1}q_i \quad (7)$$

式中: φ_i, q_i ——子结构内部结点未知水头和右端项; φ_c, q_c ——子结构出口结点未知水头和右端项; $k_{ii}, k_{ic}, k_{ci}, k_{cc}$ ——按子结构内结点及出口结点划分方式形成的子结构传导矩阵中的子矩阵; k'_{cc}, q'_c ——子结构凝聚后的出口传导矩阵和出口右端项。

其次,若穿过自由面,即子结构一部分位于渗流实域,一部分位于渗流虚域,则按结点虚流量原理,在渗流场迭代求解中,须在有限元总支配方程中不断消除子结构中虚单元和过渡单元的结点虚流量贡献。设子结构有限元方程分解为

$$\begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ic} \\ k_{ci} & k_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varphi_i \\ \varphi_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_i \\ q_c \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta q_i \\ \Delta q_c \end{Bmatrix}$$

按静态凝聚求得:

$$\varphi_i = k_{ii}^{-1}(q_i + \Delta q_i) - k_{ii}^{-1}k_{ic}\varphi_c$$

$$k''_{cc}\varphi_c = q''_c$$

$$k''_{cc} = k_{cc} - k_{ci}k_{ii}^{-1}k_{ic}$$

$$q''_c = (q_c - k_{ci}k_{ii}^{-1}q_i) + (\Delta q_c - k_{ci}k_{ii}^{-1}\Delta q_i)$$

式中 $\Delta q_i, \Delta q_c$ ——子结构内结点和出口结点虚流量修正项; k'_{cc}, q'_{cc} ——修正后的子结构出口传导矩阵和右端项; $q_i, q_c, \varphi_i, \varphi_{ci}$ 意义同前。

2 渗控措施和计算模型

二滩坝址渗控措施布置为：

帷幕 坝基帷幕深 50 ~ 100 m, 平均 80 m 左右, 厚度约 5 m; 二道坝帷幕深为 15 ~ 32 m, 厚度取 3 m; 厂房区上游布置了帷幕, 厚度取 4 m。

排水幕 坝基有两道排水幕, 第一道主排水幕分别由沿高度分四层布置的左岸 1ADL ~ 4ADL 和右岸 1ADR ~ 4ADR 排水平洞以及上下各层平洞间布置的排水幕组成, 最上层和最下层平洞分别往上和往下打排水幕, 最下层平洞在河谷底部的排水幕深约 70 余米; 第二道排水幕在坝下游坝址处, 深 30 ~ 50 m。坝后抗力体部分左右两岸分别布置了 5ADL ~ 11ADL 和 5ADR ~ 11ADR 各 7 个排水平洞, 自坝后向下游方向分三排布置, 沿高度方向也分别布置 1 至 3 层, 各层平洞间布置排水幕。水垫塘区布置有两道横向排水幕和两道纵向排水幕。两道横向排水幕深 50 m 左右, 两道纵向排水幕深为 5 m。二道坝区布置有一道排水幕, 深约 22 m。左岸厂房区有厂房、主变、调压等三大主洞室, 四周都布置排水幕。整个枢纽纵横交叉布置了大量的排水幕和排水平洞, 组成了一个复杂的排水系统。

在进行有限元离散时, 以坝顶上游面中心线上 A 点为基准, 向上游约取 560 m 至金龙沟以上, 向下游取 640 m 至中滩支沟以下, 顺水流方向长约 1 200 m, 左岸方向地基取 580 m, 右岸方向地基取 720 m。坐标系选择为 x 轴指向左岸, y 轴沿中心线指向上游, z 轴向上, 坝顶上游面中心线上 A 点坐标为 (0, 374, 1 205)。地基深度取至高程 500 m。

为了细致地模拟各道排水幕中排水孔的深度、孔距、孔径, 笔者据排水幕的不同位置 and 不同规格分别选择了 3 孔、5 孔和 7 孔等不同子结构型式, 子结构中排水孔的边界条件则根据所处位置分别选择为可能溢出面或已知水头等边界条件。一级网格划分共形成 16 280 个单元、21 172 个结点, 排水子结构超单元 162 个, 其空间网格见图 2。每个子结构根据所包含的剖分层数、排水孔的孔数, 经二次剖分后可形成几十至几千个结点。二级网格在一级网格基础上进行二次剖分形成的总结点数近 7 万个, 单元数可达 5 万多个。如此多的结点, 若不采用子结构技术, 其支配方程中总传导矩阵的容量将十分庞大, 普通的微型计算机将难以进行求解。通过采用子结构技术后, 各子结构内点都被凝聚掉, 总传导矩阵容量大为缩减, 每个迭代步在 586 微机上仅半个多小时即可完成计算。

在此基础上, 笔者对二滩坝址岩体进行了各种工况的三维渗流场的分析计算。下面介绍在水库正常蓄水时, 坝址基础几种主要工况的渗流场分布情况。

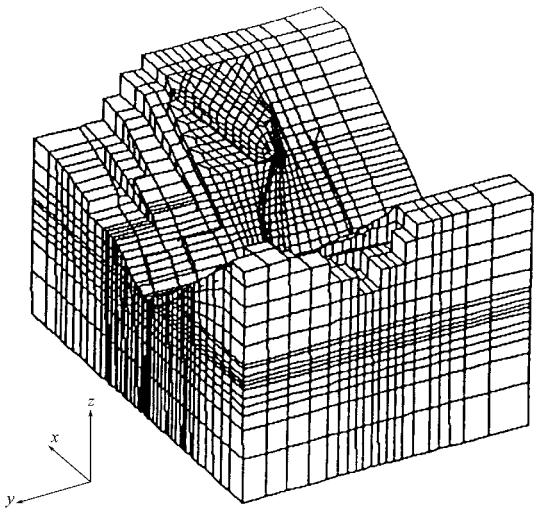


图 2 三有限元网格

Fig.2 Three Dimensional finite mesh

3 渗流状态和渗控措施分析

3.1 坝基的渗流状态

计算结果表明, 在水库蓄水后, 库水经上游帷幕阻渗后继续沿坝基向下游渗透, 但坝基部分由于有两道排水幕, 特别是上游主排水由四层排水平洞和各层间布置的排水幕所组成的排水系统较为有效, 因而经过坝基的渗流大部分被坝基排水幕截住。图 3 为按设计方案计算的地下水位等值线图。从图中看出, 库水还通过大坝的两个坝端向下游绕流, 左岸绕流的一部分被地下厂房排水系统截去, 另一部分则被左岸抗力体排水幕截去, 右端绕流则为右岸抗力体排水幕所截。由于渗控措施较好, 两岸大部分坝基的地下水位低于坝底, 使大

部分坝基面处于非承压状态,即使出现承压,扬压力也很小,对大坝基础的稳定十分有利.图 4 为渗控措施全部失效时地下水位等值线图,库水和山体地下水毫无阻挡地通过坝基向下游渗透,地下水位和扬压力非常大,因此足见设计方案的渗控措施效果十分显著.

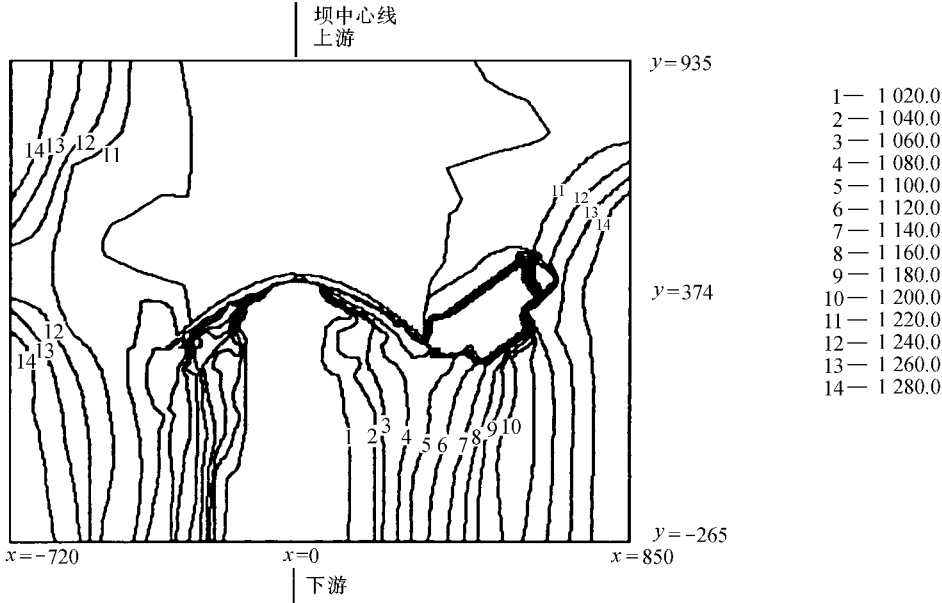


图 3 地下水位等值线(设计方案,单位 :m)

Fig.3 Isolines of groundwater level(Design scheme)

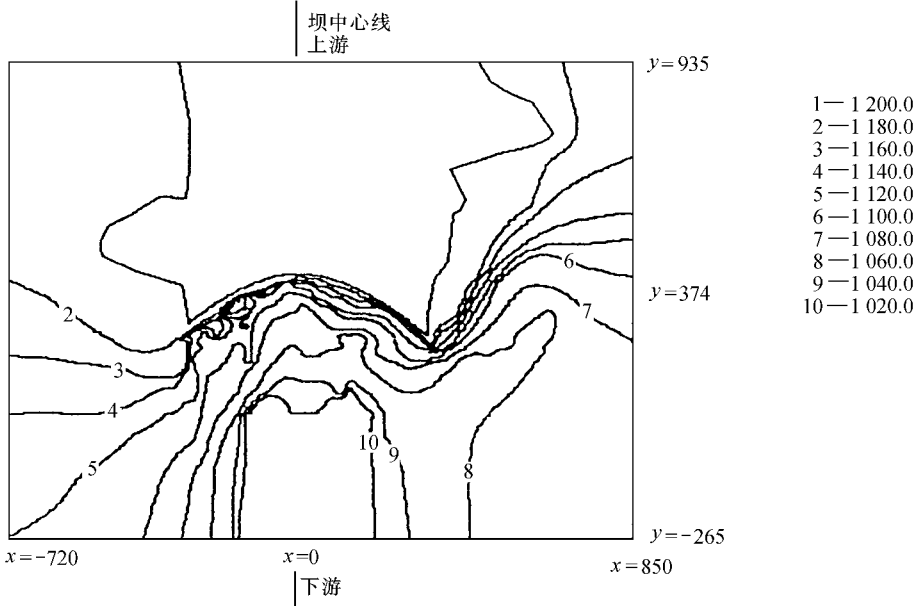


图 4 地下水位等值线(渗控措施失效,单位 :m)

Fig.4 Isolines of groundwater level(Seepage control measures uneffected)

通过计算帷幕失效对坝基渗流场的影响,所得结果表明,帷幕对坝基渗流场水头分布的影响很小,这是由于二滩水电站地基比较完整,渗透性小,因而帷幕对降低扬压力作用很小.所以,为了有效地降低扬压力和地下水位,应以排水为主.

为了解排水系统对坝基渗流场的影响,分别计算了帷幕失效、排水系统失效 50% 的情况.计算结果表明,坝区渗流场的等水头线分布与设计方案规律性是一致的,但坝基地下水位和坝区扬压力都有不同程度的提高,右岸的最大值 5 m 左右,左岸最大值达 7 m 左右.图 5 是其等值线图.由于二滩坝基渗透系数较小,因而排水系统对渗流场的影响较为明显,因而应尽量保证各排水幕正常工作.

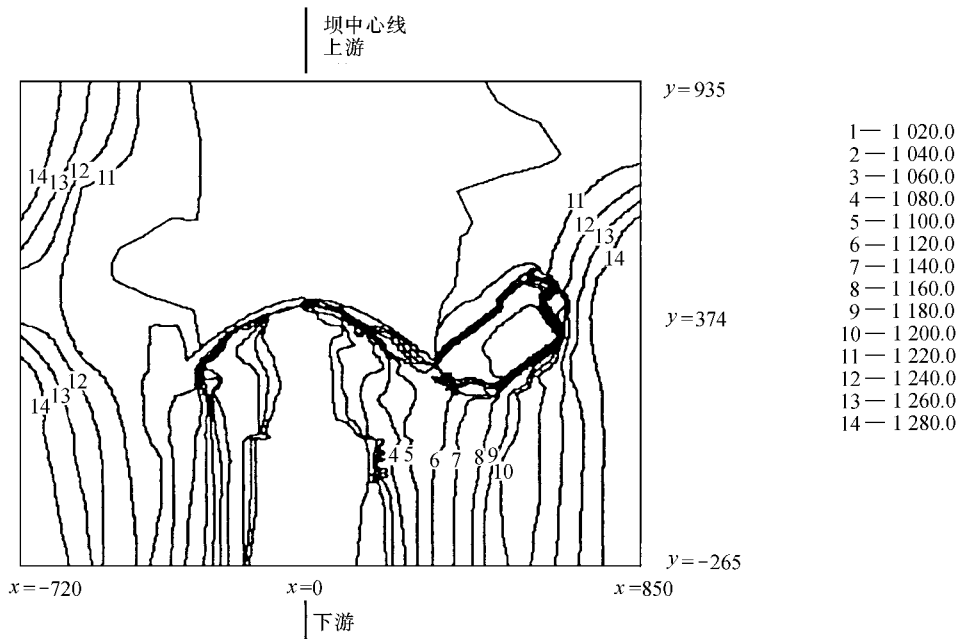


图 5 地下水位等值线(部分渗控措施失效,单位:m)

Fig.5 Isolines of groundwater level(seepage control measures partly uneffected)

3.2 其他区域的渗流状态

图 6 和图 7 分别为设计方案正常蓄水位时 $y = 100\text{ m}$ 和坝中心线 $x = 0$ 两剖面的等水头线分布. 结合图 3 及计算结果可看出,坝后等势线的分布从两岸山体向河流方向由高至低接近平行布置,表明坝后渗流状态的主要因素是两岸山体渗水,坝基的渗流与之相比要少得多. 计算表明坝后抗力体部分地下水位高程低于山坡高程,对稳定非常有利. 图 8 给出不计两岸山体地下水的影响时 $y = 100\text{ m}$ 的等水头线,其水头分布规律完全改变了. 由此可见,抗力体的排水系统能有效地截取两岸山体的来水,降低了地下水位和扬压力,有利于抗力体的稳定.

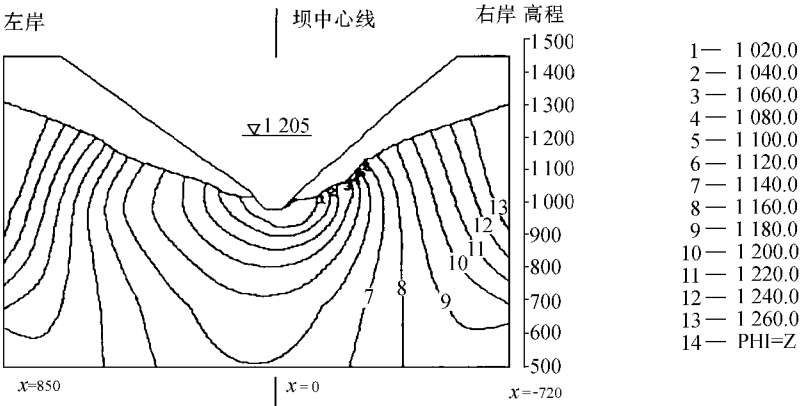


图 6 截面 $x = 0$ 等水头线(设计方案,单位:m)

Fig.6 Section $x = 0$ isolines of water head(Design scheme)

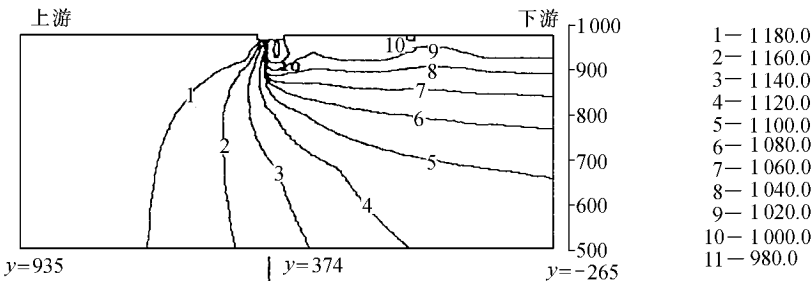


图 7 截面 $y = 100\text{ m}$ 等水头线(设计方案,单位:m)

Fig.7 Section $y = 100\text{ m}$ isolines of water head(Design scheme)

水垫塘有 2.5 m 厚的混凝土底板,并布置了纵横交错的排水平洞的和排水幕. 由于水垫塘排水幕出口较低,低于下游水头,因此,水垫塘就好像一个大型排水漏斗,两岸的山体来水、通过坝基的渗流和通过地下厂

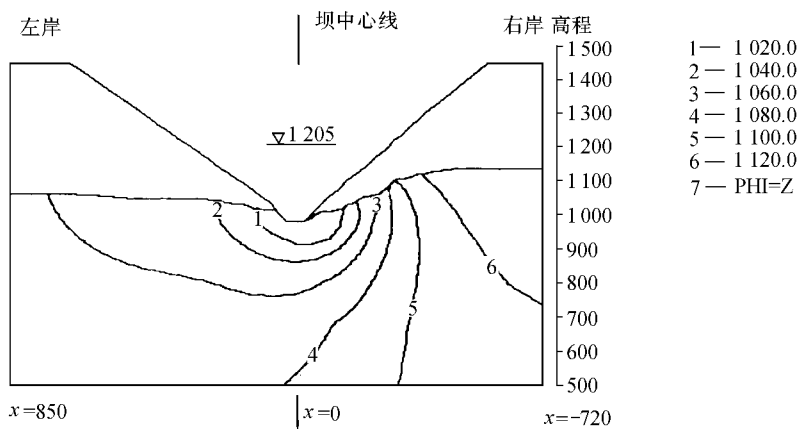


图 8 截面 $y = 100\text{ m}$ 等水头线(不考虑山体地下水位,单位: m)

Fig.8 Section $y = 100\text{ m}$ isolines of water head (without consideration of mountain groundwater)

房的部分渗流以及下游河床的渗流除被渗控措施设置的排水系统截取外都将流向水垫塘后排出,图 6 所示的等势线证明了这一点. 因此水垫塘排水系统在渗控方案中占有重要地位,应保证水垫塘的抽排系统有效地工作,从而保证整个渗控方案的有效实施.

厂房区的排水效果亦较好,从图 3 所示的等值线可看出,在围绕厂房区四周的排水系统作用下,该区形成一个方形漏斗形区域,有效地阻挡了厂房四周的来水. 从方形漏斗区密集的等值线布置可知,此处流态急剧变化,水力梯度较大. 由于地下厂房远离河床,山体地下水对其影响很大,因而为了确保厂房安全,应注意保证排水措施正常工作.

4 结 论

本文采用的排水子结构技术能够细致、严密地模拟二滩坝基各种排水洞和排水孔的孔径、孔距、孔深等排水设施及其边界条件,有效地反映带有复杂渗控措施的二滩坝基的三维渗流场的分布规律. 计算结果表明二滩枢纽的渗控措施设计方案是较为有效的,渗控效果较好. 枢纽坝基和坝后的扬压力值很小,甚至根本没有扬压力,这对坝基和抗力体的稳定性是十分有利的.

致谢 本文计算过程中得到成都勘测设计院张惠林教授级高级工程师的支持和帮助,特此感谢!

参考文献:

[1] 速宝玉,朱岳明. 不变网格确定渗流自由面的结点虚流量法[J]. 河海大学学报,1991,19(5): 113~117.
[2] 朱岳明,张燎军. 渗流场求解的改进排水子结构法[J]. 岩土工程学报,1997,19(2): 69~76.

Analysis of Three Dimensional Seepage Field of the
Ertan Hydropower Project Foundation

ZHANG Liao-jun, ZHU Yue-ming

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract Based on the method of nodal virtual flow rate of an unvaried finite mesh, the theorem and the method for improving drainage substructure are discussed. The complicated drainage system of the Ertan hydropower project foundation is simulated. The seepage state of the dam foundation and the structure behind the dam and the effect of seepage control are studied in detail. The seepage control measures for the Ertan project foundation are evaluated.

Key words ertan hydropower project ; dam foundation ; drainage substructure ; seepage field ; seepage control measures