

长江三峡碾压混凝土坝方案坝段渗控特性分析

朱岳明¹, 张贵寿², 徐惠民³

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098;

2. 绍兴文理学院, 浙江绍兴 312000; 3. 南京市水利规划设计院, 江苏南京 210008)

摘要 基于长江三峡大坝碾压混凝土方案左厂房 12 号坝段上部为常态混凝土、下部为上下游面均设有常态混凝土的防渗结构型式的碾压混凝土坝的特点, 借助于渗流场求解的结点虚流量法及排水子结构技术, 并提出“排水孔开关器”的概念和渗流非均质成层材料单元模型, 对坝中设计时存在的主要渗流疑虑问题、大坝的防渗与排水设施渗控方案的特性进行了数值分析研究. 结果表明, 导致碾压混凝土坝渗流特性复杂化的坝体强渗透各向异性是难以避免的, 但只要有合理的防渗结构和排水设施, 坝体渗流场是能够很好地得到控制的.

关键词 混凝土本体; 层面; 缝面; 层厚; 升程; 非均质成层材料单元模型; 排水孔开关器; 排水子结构
中图分类号 TV642.2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-198X(2000)02-0001-06

在三峡大坝曾有过的碾压混凝土重力坝论证方案中, 左厂房 12 号坝段剖面以高程 90 m 为界上下为常态混凝土结构和碾压混凝土结构. 施工时混凝土本体层厚 0.3 m, 升程高度 2~3 m. 由于施工间歇的影响, 层厚之间会形成层面, 升程之间会形成缝面. 缝面需进行抗渗及抗力处理. 大坝的上游面为常态混凝土防渗结构, 防渗体后设排水孔幕, 存在的主要渗流问题有 (a) 坝上游面防渗体的防渗效果 (b) 防渗体产生水平向或竖向贯穿性裂缝时坝体渗流场特性及层面与缝面扬压力的变化情况 (c) 层面和缝面强透水性对坝体渗流特性的影响, 尤其当坝体个别高程处存在集中渗水通道时坝体渗流特性的变化 (d) 层面和缝面的施工非均匀性对坝体渗流场尤其是对层面及缝面上扬压力分布的可能不利影响 (e) 坝体防渗结构后排水幕的排水作用, 当部分排水孔失效时坝体渗流场的变化 (f) 坝基防渗帷幕及多道排水幕的作用, 当坝基部分渗控设施失效时坝基面上扬压力的分布是否仍能满足设计要求 (g) 坝上游面采用二级配混凝土防渗体或变态混凝土防渗体或无防渗体时大坝的渗流特性.

本文在笔者已有工作的基础上提出“排水孔开关器”新概念和渗流非均质成层材料单元模型, 用三维有限单元法对上述诸问题进行了较深入的分析研究.

1 碾压混凝土坝非均质成层材料单元模型

文献 [1] 根据碾压混凝土坝的渗流特性提出了均化多孔隙等效连续体模型和对层面与缝面的缝隙及混凝土本体分别进行刻画的非连续体模型. 前者用层面切向及法向主渗透系数来描述坝体的渗流特性, 由达西渗流理论进行渗流场的求解; 后者则需联用裂隙渗流理论和达西渗流理论来描述隙面和本体以及整个坝体的渗流行为. 两者的建模思路不同, 但有限单元法求解结果基本一致, 满足一般的工程要求. 前者简单明了, 理论成熟, 经验丰富, 求解三维问题时所需单元数相对很少; 后者现有计算程序较少且解题规模很大, 解一个重力坝平面问题就需上万个结点. 本文再介绍一种非均质成层材料单元模型 (图 1).

假定坝体是由图 1 所示的碾压混凝土非均质成层材料单元所组成, 其中在高度方向上的分层数是由本体层厚、层面隙宽、缝面隙宽和垫层体甚至常态混凝土层所决定. 此时用有限单元法求解坝体渗流场问题的关键是如何在理论上正确严密地求得这种成层材料单元的传导矩阵.

据图 1 的定义及有限单元法原理, 这种单元传导矩阵的传导系数

$$k_{ij} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}_i^T \mathbf{K} \mathbf{B}_j |J| d\xi d\eta d\zeta = \sum_{k=1}^N \int_{\xi_{k-1}}^{\xi_k} \left(\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}_i^T \mathbf{K}_k \mathbf{B}_j |J| d\xi d\eta \right) d\zeta \quad (1)$$

引进积分变量变换关系

$$\zeta = \frac{\zeta_k - \zeta_{k-1}}{2} \zeta' + \frac{\zeta_k + \zeta_{k-1}}{2} \quad (2)$$

得

$$k_{ij} = \sum_{k=1}^N \int_{-1}^1 \frac{\zeta_k - \zeta_{k-1}}{2} \left(\int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \mathbf{B}_i^T \mathbf{K}_k \mathbf{B}_j |T| d\xi d\eta \right) d\zeta' \quad (3)$$

式中: N ——层数; $\mathbf{K}_k$ ——第 k 层材料的渗透系数张量; $\mathbf{B}_i$, $\mathbf{B}_j$ 和 $|J|$ ——坐标 ξ , η 和 ζ' 的函数。

需指出的是,这种非均质成层材料单元模型的建模思想也能直接适用于碾压混凝土坝或别的成层材料结构中温度场和应力场等问题的数值分析,且图1和式(1)~(3)的思想也可毫无困难地扩展到单元同时也在 ξ 和 η 方向上的分层情况。

2 碾压混凝土坝渗流场求解

本文在碾压混凝土坝渗流场的有限元法求解中,除了运用上述非均质成层材料单元模型外,在算法上还有特色:一是用文献[2]所介绍的结点虚流量法,在计算迭代过程中能精细地搜索出渗流自由面的位置和所有渗流逸出面的大小;二是用排水子结构技术严密地模拟坝体及坝基中所有排水孔的渗流行为^[3];三是鉴于坝基有多道顶面自溢式排水孔幕,以及坝基上下游面还设有防渗帷幕,可能会在坝基排水幕中出现部分排水孔在排水而部分不在排水的工作状态,为了在计算中也能正确地仿真这一重要现象,模型中将这排水孔的顶端面事先都视为可能渗流逸出面,且对这些顶端面设置“开”或“关”的“排水孔开关器”,即据中间解的结果,分别确定各个开关器在下一步计算中应该是处于“开”还是“关”的工作状态。排水孔通常对渗流场解的影响很大,设置这种开关器对求解坝基和地下厂房厂区尤其是拱坝坝基渗流场问题是至关重要的,否则如在文献中常可见到的那样,出现极为错误的结果。另外,本文在模拟防渗体水平向和垂直向渗水裂缝以及坝体集中渗水层面与缝面时采用隙宽为 0.1 mm 的裂隙渗水单元。

3 三峡碾压混凝土重力坝方案 12 号坝段渗控特性分析

左厂房 12 号坝段高 156 m,坝基面高程 29 m,上下游水位 175 m 和 62 m,碾压混凝土坝体区坝上下游面常态混凝土防渗体厚自上而下为 4~9.2 m 和 2~4 m,宽 123.2 m 的坝基面上有厚 1.5 m 的常态混凝土垫层。坝基为闪云斜长花岗岩,平均渗透系数取 1×10^{-4} cm/s。

坝体共有 5 层廊道,其间设排水幕,共 4 层,排水孔孔径及孔距为 20 cm 和 3 m。鉴于坝上游库水水头大及下游尾水深,坝基上下游面均设置防渗帷幕,厚 2 m,深分别为 80 m 和 50 m,渗透系数 1×10^{-5} cm/s。此外,除在两道防渗帷幕的内侧分别有深 50 m 和 30 m 的坝基主排水幕外,坝基面中部尚有两道深 8 m 且向坝体内延伸至高程 42 m 处的排水幕。这 4 道排水幕中的孔径和孔距也为 20 cm 和 3 m,坝基排水孔顶面自溢高程均为 34 m。视顺河向两相邻排水孔中面和过排水孔中心垂直面为渗流对称面,计算域在坝轴线方向的厚仅 1.5 m,坝基岩体计算域深和上下游侧边界立面分别距坝踵与坝趾的距离均为 3 倍坝基面宽。计算域中的渗流边界条件有已知水头边界、不透水边界、渗流自由面边界及可能渗流逸出面边界。廊道壁面视为不渗水边界。

3.1 计算工况

针对前述渗流问题,以表 1 所列 8 个工况作为大坝渗控特性分析的计算对象。根据三峡工程碾压混凝土纵向围堰所做的室内外渗透试验与压水试验结果^[5],若无特别说明,取坝体一个升程有 9 个碾压铺筑层,缝面处理垫层的渗透系数 1.0×10^{-10} cm/s,厚 1.5 cm。表 1 中切向渗透系数、法向渗透系数及异性比系指文献[1]等效模型中层面切向和法向主渗透系数及其比值。

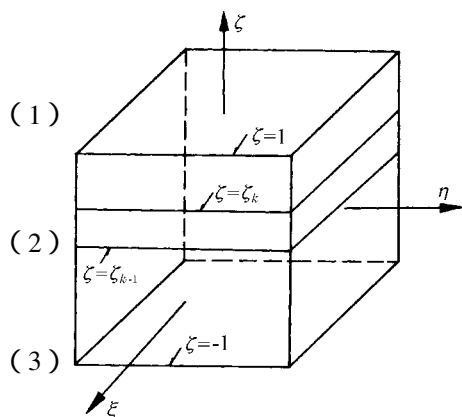


图1 非均质成层材料单元

Fig.1 Inhomogeneous multi-laminated media element

表 1 渗流计算工况
Table 1 Cases of seepage calculation

工况	层面隙宽 / μm	缝面隙宽 / μm	层面切向渗透系数 / $10^{-5}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	层面法向渗透系数 / $10^{-10}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$	渗透异性比
1	40	50	1.33	9.95	13 367
2	40	50	1.33	9.95	13 367
3	5	10	2.71	9.95	27
4	40	50	1.33	9.95	13 367
5	40	50	1.33	9.95	13 367
6	40	50	1.33	9.95	13 367
7	40	50	1.33	9.95	13 367
8	40	50	1.33	9.95	13 367

注：工况 1 坝内无排水幕，防渗体渗透系数小于层面法向渗透系数 1 个数量级；工况 2 坝内无排水幕，但防渗体渗透系数为坝体层面法向的 1/5 倍；工况 3 和工况 4 坝体和坝基有排水幕；工况 5 坝体在高程 35 m、55 m 和 75 m 有隙宽为 0.1 mm 的集中渗水缝面，坝上游面混凝土防渗体有贯穿性竖直裂缝；工况 6 坝体在高程 35 m、55 m 和 75 m 有隙宽为 0.1 mm 的集中渗水缝面，这 3 个高程处防渗体也有水平向贯穿性裂缝；工况 7 高程 90 m 以下为全断面碾压混凝土方案，上游面厚 4~9.2 m 的二级配碾压混凝土作为防渗体；工况 8 高程 90 m 以下坝体为全断面三级配碾压混凝土体。

3.2 计算结果分析

3.2.1 工况 1、2

这两个工况中未考虑坝体及坝基中排水幕的作用，目的是考察坝上游面常态混凝土防渗体相对抗渗能力的渗控作用。工况 1 为设计情况，而工况 2 中防渗体渗透系数只比碾压混凝土层面法向渗透系数小半个数量级。坝体渗流场等水头线的分布如图 2、图 3 所示。由于坝体内无排水设施，顶部常态混凝土坝体中的渗流自由面位置很高，几乎整个坝下游面均为渗流逸出面，因此无论在常态还是碾压混凝土坝中均应设置排水幕。因坝体断面周边均有常态混凝土，且碾压混凝土为相对强透水区，随着坝上游面防渗体透水能力的增加，坝体底部碾压混凝土区渗透水流对上部常态混凝土中渗透水流的顶托作用就大，防渗体的防渗作用就小，防渗体上下游面的水头差大约从 61 m 降到 24 m。图 2、3 中有一值得注意的现象是，在坝体碾压混凝土区，强渗透各向异性导致所有等水头线都呈水平向分布，即平行于层面切向的大主渗透方向的分布。这一现象也正好从理论上说明了在早期的个别碾压混凝土坝工程运行中所出现的事实：当坝上游面无防渗设施尤其也没有排水设施时，坝下游面上的渗流逸出面的逸出线位置几乎与上游库水位同高。同时，这也解释了在许多当今已建的碾压混凝土坝中为何在坝下游面局部区渗流逸出线或逸出点位置过高的道理。

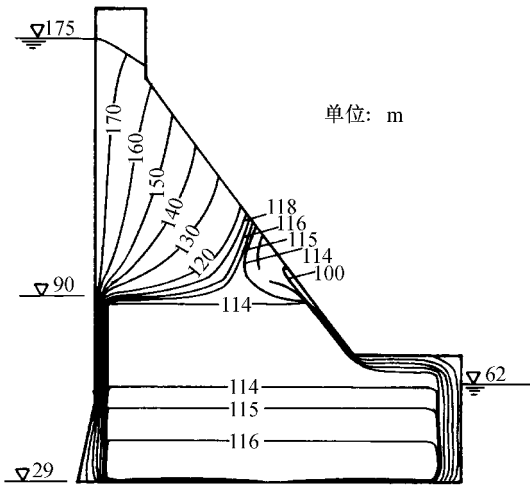


图 2 工况 1 坝体等水头线分布

Fig.2 Distribution of equivalent lines of hydraulic heads for case 1

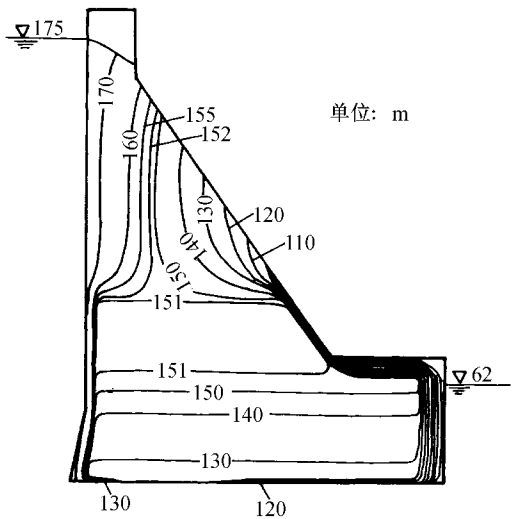


图 3 工况 2 坝体等水头线分布

Fig.3 Distribution of equivalent lines of hydraulic heads of case 2

3.2.2 工况 3、4

这两个工况的区别在于层面和缝面隙宽的不同。值得一提的是：当层面和缝面的水力隙宽只有 5 μm 和

10 μ m 时坝体已呈现出明显的渗透各向异性,异性比达 27;随着层面和缝面水力隙宽的增加,坝体渗透各向异性比迅速增大,可达 3~5 个数量级,甚至更大.因此,就当前的碾压混凝土坝施工方法、技术与工艺水平而言,坝体几乎不可避免地成为渗透各向异性比达两个以上数量级的挡水建筑物,其渗流特性要远比常态混凝土坝的复杂^[4].

工况 3 的坝体渗流场相邻排水孔中间剖面(下同)等水头线分布和层面与坝基面上的扬压力水头分布见图 4. 工况 4 的结果与工况 3 也甚为相同. 在碾压混凝土区,由于有抗渗性好的坝上游面常态混凝土的防渗及防渗体后垂直于层面和缝面的排水幕的存在,场中渗透水头几乎完全集中损耗在防渗体内,排水幕后坝体出现了大面积的疏干现象. 在常态混凝土坝区,在排水幕和碾压混凝土渗流疏干区的共同作用下,实际渗流域只局限于排水幕的上游区. 这两个工况中坝基面上的扬压力分布甚为一致,这与坝基常态混凝土垫层与坝基岩体的透水能力相差很大有关. 基面垫层及混凝土本体隔断了坝体与坝基之间渗透水流的有效交换,坝基面上的扬压力只取决于坝基排水廊道排水幕的排水高程、岩体的渗流特性和坝基渗控措施的布置情况.

3.2.3 工况 5 6

工况 5 是在工况 4 的基础上,再考虑碾压混凝土坝体在典型高程 35 m、55 m 和 75 m 有水力隙宽均为 0.1 mm 的贯穿性缝面,同时鉴于层面和缝面的施工非均匀性,考虑排水孔周围 5 m 和距坝下游面 15 m 范围内的层面和缝面的隙宽仅 10 μ m,该范围内

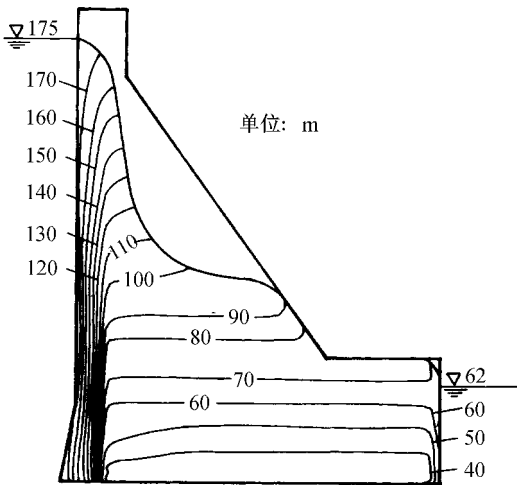


图 5 工况 5 坝体等水头线分布

Fig.5 Distribution of equivalent lines of hydraulic heads of case 5

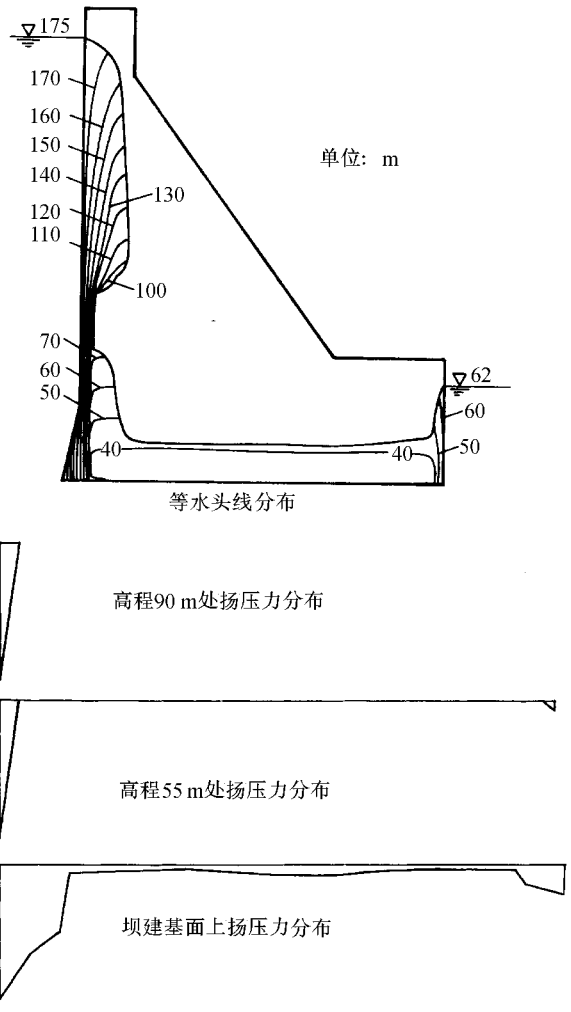


图 4 工况 3 扬压力水头及坝体等水头线分布

Fig.4 Distribution of uplift forces and equivalent lines of hydraulic heads of case 3

单元的层面切向渗透系数较其他区的小两个数量级,相对造成排水幕的排水不畅性和坝下游面的堵渗作用,增加层面和缝面的扬压力,还考虑自上而下在整个常态混凝土防渗体中出现贯穿性竖直面型渗水裂缝,缝宽 0.2~0.1 mm,裂隙位置在相邻两排水孔的中间($y=1.5$ m). 在工况 5 的基础上,工况 6 又在高程 35 m、55 m 和 75 m 缝面处坝上游面防渗体也有 3 道水平裂缝. 图 5 为工况 5 的计算结果,工况 6 的计算结果与工况 5 的基本相同. 由于库水直接通过防渗体的裂缝渗向坝内层面和缝面,尤其是上述抗渗处理不当的缝面,大大地扩大了坝体渗流实域范围,它包含了整个碾压混凝土坝体域,渗流逸出线从常态混凝土坝区底部在碾压混凝土与常态混凝土的交接面处就出露. 但由于坝体中有强排水能力的排水幕的存在,在碾压混凝土区等水头线都在排水幕处仍然自垂直状分布约经 90 $^\circ$ 角的急弯折成水平向的展延,且其位置高程比其水头值只小几米,亦即此时层面或缝面上的扬压力水头也只有几米,仍远小于设计允许值. 由于坝体及坝基中排水幕的排水

作用,这两个工况中坝下游面河床尾水也为渗流场的入渗源。

3.2.4 工况 7 8

这两个工况中碾压混凝土坝上游面未设常态混凝土防渗体,渗流场的水头分布见图 6 和图 7。工况 7 以坝上游面的二级配碾压混凝土作为防渗体,虽然垂直向的渗透系数只与坝体层面法向的相同,水平向的较三级配区层面切向的只小 1 个数量级,但由于其后排水幕的作用,碾压混凝土区的等水头线都在排水幕处弯成水平向伸至坝下游面,水头值与位置高度基本相同,层面和缝面得到了充分的疏干,所残剩的扬压力很小。图 7 中坝体碾压混凝土区为全断面三级配碾压混凝土,坝上游面没有任何形式的防渗体,在排水幕的截渗作用下,坝体层面和缝面上的扬压力仍被较充分地得到了控制,但此时渗过坝体的渗流量大大地增加,坝上游面三级配混凝土层面和缝面中的水力比降也较大。比较图 7 和图 5 可知,当坝上游面防渗体产生贯穿性裂缝时,防渗体的防渗作用已基本损失殆尽。

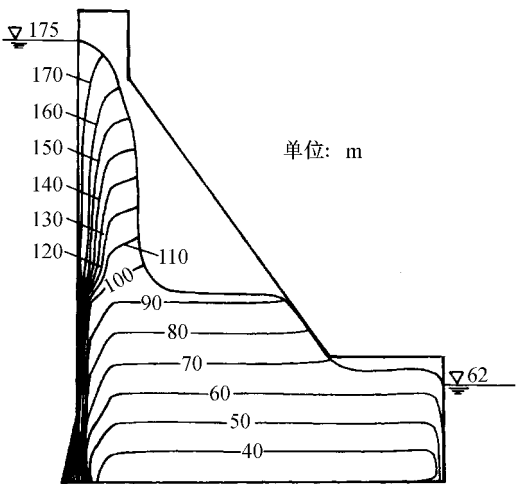


图 6 工况 7 坝体等水头线分布

Fig.6 Distribution of equivalent lines of hydraulic heads of case 7

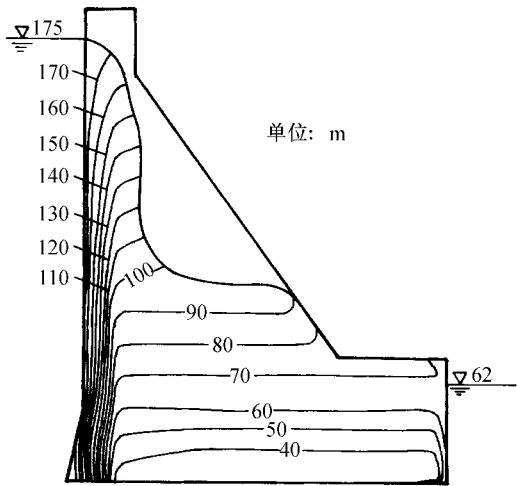


图 7 工况 8 坝体等水头线分布

Fig.7 Distribution of equivalent lines of hydraulic heads of case 8

综上所述,碾压混凝土坝层面和缝面上的扬压力主要依靠排水幕来控制,而对坝体渗流量及坝下游面逸出点高度的控制,则需设置防渗体。

3.2.5 其他

经进一步分析研究,碾压混凝土坝中排水孔的间距可较目前工程中常用的 3 m 再大些,比如 4 ~ 5 m。坝基中间两道抽排水幕失效时坝基面上的扬压力分布仍能满足设计要求,当上下游面主排水幕同时失效,而中间排水幕和防渗帷幕都好时,坝基面上扬压力也能满足设计要求。此外,若没有排水幕的存在,坝基防渗帷幕的防渗作用是非常有限的,远远不能满足坝基扬压力图形的设计要求。

4 结 语

本文对长江三峡左厂房 12 号坝段曾有过的碾压混凝土重力坝方案的渗控特性进行了三维有限单元法的分析研究,其中针对碾压混凝土坝的结构特点及坝基多道排水幕的工作情况,提出了供渗流场求解的非均质成层材料单元模型和供判断及模拟坝基排水幕中各个排水孔是否处在排水或不排水工作状态的“排水孔开关器”。经多种工况的比较计算,较详细地研究了左厂房 12 号坝段坝体防渗结构与排水设施在渗控方面的作用及其相辅相成的关系。

就目前的施工方法、技术及工艺水平而言,碾压混凝土坝体必然是一强渗透各向异性体,其渗透各向异性比常常可达 2 ~ 5 个数量级,甚至更大。降低坝体渗透各向异性比程度的最经济、最有效的方法是,施工时层面的间歇时间要尽可能短以及有严格的施工管理与监督制度。渗控设计的原则应是:用排水幕来控制坝体层面和缝面上的扬压力,用坝上游面防渗结构来控制坝体的渗流量和提高坝体的耐久性。

参考文献：

- [1] 朱岳明, 张燎军. 龙滩高碾压混凝土重力坝的渗控方案研究[J]. 水利学报, 1997 (3): 1~8.
- [2] 朱岳明, 陈振雷, 吴 恺等. 用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.
- [3] 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 (3): 69~76.
- [4] 朱岳明, 黄文雄. 碾压混凝土及碾压混凝土坝渗流特性分析研究[J]. 水利水电技术, 1995 (12): 49~57.
- [5] 任旭华. 碾压混凝土坝的渗流和渗控、应力和稳定[D][学位论文]. 南京: 河海大学, 1997.

Analysis of Seepage Control Characteristics of the Optional-scheme of Three Gorges RCC Gravity Dam on the Yangtze River

ZHU Yue-ming¹, ZHANG Gui-shou², XU Hui-min³

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

2. Shaoxing College of Arts and Sciences, Shaoxing 312000, China ;

3. Nanjing Design and Plan Institute of Water Conservancy, Nanjing 210098, China)

Abstract : Taking into account the special structural properties of the left power house block of conventional concrete above EL. 90 m and RCC concrete below the elevation and with an upstream conventional concrete slab structure for impermeabilization, the authors develop an inhomogeneous multi-laminate media element model for seepage analysis of RCC dams based on the research of the numerical procedure of nodal virtual flux and the technique of draining substructure for drainage holes. In order to completely emulate the real seepage control behavior of the drainage holes located in the area of the dam foundation, a new concept of " drainage-hole seepage switch " is suggested and added to the drainage substructures. A few related seepage problems in the design of the dam and the seepage control characteristics of the seepage control scheme composed of the upstream seepage protection slab and drainage-hole curtains are numerically analyzed in detail. The RCC dam body is a strong anisotropic concrete structure and therefore the seepage property of the dam is considerably complicated. But if the seepage protection and draining control scheme is reasonably designed and constructed the characteristics of the seepage fields of the dam can be well controlled.

Key words : matrix concrete of RCC ; lift interface ; lift joint interface ; thickness of the matrix concrete layer ; course of one continuous construction of lifts ; inhomogeneous multi-laminate media element model ; drainage-hole seepage switch ; draining substructure