

光照混凝土重力坝渗流特性和渗控方案分析

罗平平 朱岳明 岑威钧

(河海大学水利水电工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 :以 200 m 级高的光照混凝土重力坝 12 号典型溢流坝段为研究对象 ,借助于结点虚流量法、排水子结构和排水孔开关器技术 ,用三维渗流有限单元法 ,计算分析大坝渗流场各主要影响因素的作用 ,研究坝体和坝基的渗流特性 ,经过对比和综合分析 ,得出坝基的优选渗控方案 ,并评估设计扬压力水头图形的可靠性、合理性和安全性。

关键词 重力坝 渗控方案 排水子结构 数值模拟

中图分类号 :TV642.3 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2004)05-0037-04

设计中的光照混凝土重力坝位于北盘江中游 ,坝基岩体主要由砂岩、粉砂岩、灰岩及泥质灰岩等地层组成 ,倾向下游 ,倾角约 57°。坝基中存在贯穿性强的透水断层 F₁ 和 F₂ ,影响带宽分别约为 20m 和 10m ,压水试验渗透率 ω 平均值都约为 35 L/(min·m·m)。坝体主要由四级配的 C₁₅和 C₂₀以及三级配的 C₂₀和 C₂₅混凝土组成 ,渗透系数试验值分别为 4.39 × 10⁻¹⁰ , 3.47 × 10⁻¹⁰ , 2.22 × 10⁻¹⁰ 和 1.15 × 10⁻¹⁰ cm/s。正常运行时坝上、下游水位分别为 745.00m 和 583.50m ,水头差为 161.50 m ,洪水期工况坝上、下游水位分别为 747.07 m 和 608.50 m ,水头差也达 138.57 m。

现拟大坝渗控设计方案中 ,降低坝建基面扬压力的主要措施是设置堵渗性质的混凝土灌浆帷幕和排水性质的排水孔排水幕。在河床 8 段坝基中 ,除坝上、下游面的防渗帷幕及帷幕后的排水孔主排水幕外 ,坝基还设有 4 道抽排水幕 ,以降低和控制坝建基面上的扬压力。河床坝段和两岸挡水坝段建基面以及坝体水平剖面上的设计扬压力分别如图 1(a) , (b) 和 (c) 所示 ,其中 H_u 和 H_d 分别为坝上、下游水深 ,α₁ 和 α₂ 为坝建基面上游主排水幕处和坝基溢

流型抽排水幕处的扬压力折减系数 ,α 为坝上游面坝体内排水孔排水幕处的扬压力折减系数。

本文以光照混凝土重力坝 12 号河床溢流坝段为典型研究对象 ,进行三维有限单元法渗流分析 ,研究坝体和坝基的渗流特性以及渗控设计方法和方案 ,对比分析各主要渗流影响因素的作用及其对大坝安全性的影响程度 ,综合评估设计扬压力图形的可靠性、合理性和安全性。

1 坝基渗流场的有限单元法求解

1.1 基本理论

本文视坝体混凝土及坝基岩体为非均质多孔隙等效连续体渗透介质 ,大坝渗流场为有自由面的三维稳定达西渗流场 ,控制方程为 :

$$(K_{ij}H_{,j})_{,i} = 0 \tag{1}$$

边界条件为 :

$$H|_{\Gamma_1} = H_1 \quad K_{ij}H_{,j}n_i|_{\Gamma_2} = 0 \tag{2}$$

$$K_{ij}H_{,j}n_i|_{\Gamma_3} = 0 \quad \text{且} \quad H = X_3 \tag{3}$$

$$-K_{ij}H_{,j}n_i|_{\Gamma_4} \geq 0 \quad \text{且} \quad H = X_3 \tag{4}$$

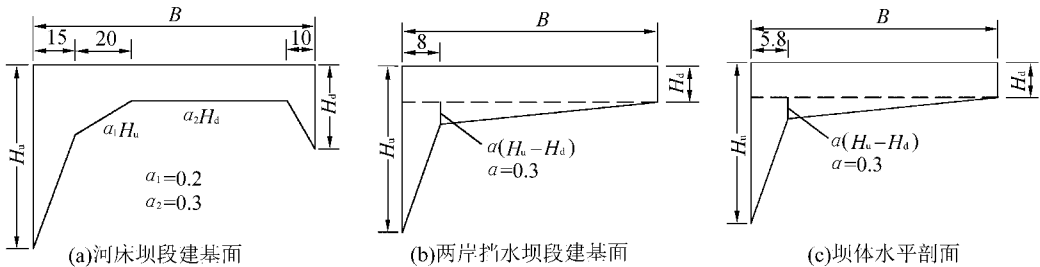


图 1 不同断面上设计扬压力水头分布示意图(单位 :m)

作者简介 :罗平平 (1976—) ,男 ,江西上高人 ,博士研究生 ,从事岩体注浆理论研究。

式中: K_{ij} 为渗透系数张量 ($i, j = 1, 2, 3$); H 为总水头; H_1 为边界已知水头; X_3 为位置水头; n_i 为渗流边界外法线方向余弦; $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ 和 Γ_4 分别为第一类和第二类渗流边界, 以及渗流自由面和逸出面边界。

对于这样的有自由面的边界非线性渗流问题的求解, 可采用文献 [1] 所介绍的固定单元网格的结点虚流量法。

1.2 排水孔排水子结构

为了更好地模拟排水孔的三维排水降压的真实渗流行为和尺寸效应, 文献 [2] 于 1992 年率先提出了排水孔排水子结构的概念, 并进行了尝试。在此技术思想和结点虚流量法的基础上, 朱岳明等人^[1, 3, 4]相继在理论不断完善的情况下提出了改进排水子结构技术, 主要内容有:

改进排水子结构的有限单元法支配方程:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$h_1 = k_{11}^{-1}(q_1 - k_{12}h_2), h_2 = q_2' / k_{22}' \quad (6)$$

$$k_{22}' = k_{12} - k_{11}k_{21}^{-1}k_{22}, q_2' = q_1 - k_{21}^{-1}k_{11}q_2 \quad (7)$$

式中: h_1 和 q_1 为子结构内部结点未知水头和右端项; h_2 和 q_2 为子结构出口结点未知水头和右端项 (含邻域单元的结点流量贡献); k_{ij} ($i, j = 1, 2$) 为按子结构内结点及出口结点对子结构传导矩阵进行分块划分的子矩阵; k_{22}' 和 q_2' 为子结构凝聚后的出口传导矩阵及出口右端项。

当排水孔与自由面相交时, 子结构部分位于渗流实域内, 部分位于虚域内, 此时子结构出口传导矩阵和右端项须按结点虚流量法原理^[1, 3]进行修正, 消除子结构虚域中虚单元和过渡单元的虚传导矩阵贡献 $\Delta k_{22}'$ 和虚等效结点流量贡献 $\Delta q_2'$ 。

2 渗流特性和渗控方案分析

2.1 渗流场数值计算建模

将岩体视为等效连续渗透体, 且认为钻孔压水渗流流态为平行径向流, 则平均意义上岩体的达西渗透系数 k 与压水试验渗透率 ω 值之间的关系为^[5]:

$$k = 2.6526 \times 10^{-4} \times \omega \times \ln\left(\frac{R}{r_0}\right) \quad (8)$$

式中: R 为压水试验的影响半径, $R = 2\,000\text{ cm}$; r_0 为压水孔半径, $r_0 = 7.6\text{ cm}$ 。

12 号河床坝段中, 坝基上、下游面垂直防渗帷幕周围岩体的透水性较小, 取防渗帷幕单元的渗透系数为 $8.31 \times 10^{-6}\text{ cm/s}$ 。因整个坝段的渗流特性呈准三维流态, 考虑到该坝段坝基水文地质条件的情况, 视过坝体和坝基中两相邻排水孔中面坝上、下游向立面为渗流水力对称面 (流面), 以及过每个排水

孔中心的上、下游向立面也为渗流水力对称面, 因此计算域沿坝轴线方向的厚度仅为排水孔间距的一半。坝踵距坝基计算域上游和坝趾距计算域下游边界立面的距离, 以及坝建基面距坝基计算域地面的距离, 均约为坝建基面宽度的 3 倍。图 2 为 12 号河床溢流坝段渗流场有限单元法求解的单元网格图, 不计排水孔排水子结构内部结点和单元时, 网格中共有 3 641 个结点和 2 426 个空间八结点六面体线性等参元。

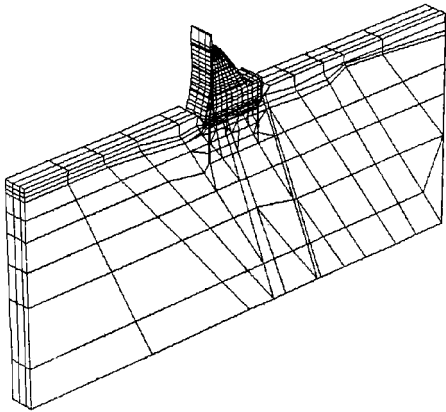


图 2 渗流场计算域及单元网格

2.2 大坝渗流特性对比分析和渗控方案研究

2.2.1 计算工况

针对坝体和坝基工程情况, 以及前述渗控设计方案的特点, 本文选用表 1 所示的计算工况对诸种主要渗流影响因素进行计算分析, 研究大坝的渗流特性, 优选渗控方案。计算中: ①所有工况都考虑排水廊道的影响; ②4 道抽排水幕的孔径都为 15 cm, 孔距都为 3 m; ③幕深从坝建基面算起, 坝建基面高程为 555 m。

表 1 渗流场计算工况

工况号	上游防渗帷幕		下游防渗帷幕		上、下游主排水幕			4 道抽排水幕深/m
	至高程 /m	幕厚 /m	至高程 /m	幕厚 /m	孔径 /cm	孔距 /m	幕深 /m	
1	460	3.48	460	0.87	15	3	47.5	15
2	460	3.48	460	0.87	15	3	47.5	12
3	460	3.48	460	0.87	15	3	47.5	17
4	485	3.48	485	0.87	15	3	47.5	12
5	460	4.48	460	1.87	15	3	47.5	12
6	460	4.48	460	1.87	15	3	25.0	12
7	460	3.48	460	0.87	15	6	47.5	12
8	460	3.48	460	0.87	20	3	47.5	12
9	460	3.48	460	0.87	15	3	47.5	
10	460	3.48	460	0.87	15	3	47.5	
11	460	3.48	460	0.87				12
12					15	3	47.5	12

注 ①9 号工况无抽排水幕; ②10 号工况仅第 2 道抽排水幕正常; ③11 号工况的上、下游主排水幕失效; ④12 号工况的上、下游防渗帷幕失效。

2.2.2 抽排水幕渗控效果分析

在工况 1~3 中, 计算结果表明坝基渗流场水头

分布基本相同。可见,在大坝上、下游防渗帷幕和主排水幕的渗控作用下,坝建基面中间浅层抽排水幕的渗控作用已不明显。限于篇幅,这里只给出工况 2 中过排水孔中心的垂直剖面 $y=0$ 上的渗流场等水头线分布(图 3(a))。据图,大坝在强排水设施的排水降压作用下,坝中自由面较贴近大坝上游面,自由面与排水幕之间各等水头线几乎呈水平状态向坝下游面折弯,可见在坝体内排水幕与自由面之间水平剖面上的扬压力很小。坝基区出现 2 条平行分布 10 号等水头线,仅比坝建基面高程高 5 m。原因是第 2 道抽排水幕正好位于 F_1 断层带上, F_1 断层带成了坝基的强排水通道,对坝基的渗流场起到了控制性“边界”的作用。

工况 9 假定坝基 4 道抽排水幕全部失效。工况 10 假定 4 道抽排水幕中只有位于 F_1 断层上的第 2 道工作正常。工况 9 的结果如图 3(b);工况 10 的结果几乎与工况 2 类似,如图 3(a)。比较后发现,只要位于 F_1 断层带上的第 2 道抽排水幕失效,坝建基面局部区水头就会出现明显的变化。可见长期确保坝基第 2 道抽排水幕排水畅通的重要性。

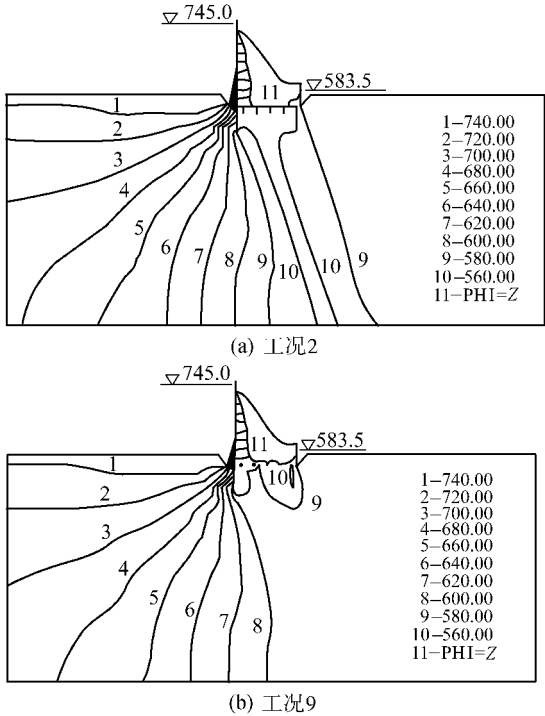


图 3 抽排水幕渗控效果等水头线分布(单位:m)

2.2.3 防渗帷幕防渗效果分析

工况 4 和工况 5 主要是对坝基防渗帷幕深度和厚度作了敏感性分析(如图 4(a))(b)),与图 3(a)结果相比,坝基中的等水头线分布均无明显变化,这得益于坝基排水设施和 F_1 断层带的强排水作用。帷幕降低坝建基面扬压力的作用主要取决于帷幕的整体性和其与周围岩体的相对不透水性,而不是帷幕的

厚度和深度。因此单从控制坝建基面扬压力要求来看,上、下游防渗帷幕无需太深和太厚。混凝土大坝特别是高坝对基础岩体的要求很高,要达到一个较好的防渗效果,帷幕的渗透系数需处处小于 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}^{[6]}$,这在本工程中很难做到。

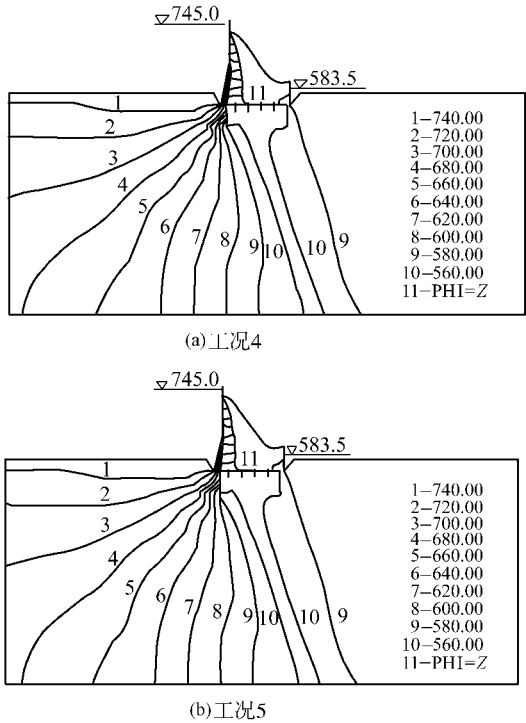


图 4 防渗帷幕防渗效果等水头线分布(单位:m)

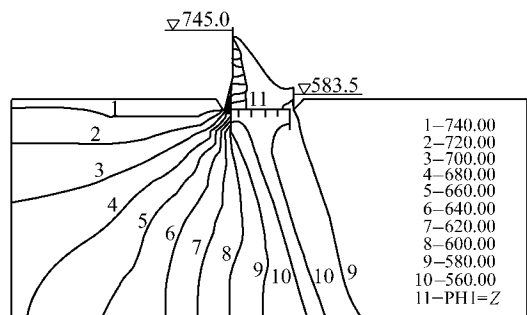
2.2.4 排水幕的排水降压效果分析

若坝基上、下游主排水幕的深度只有 25 m,比设计值浅 22.5 m(工况 6),渗流场水头分布结果如图 5(a)。同工况 2 相比,主排水幕底部区域水头有明显变化,但坝建基面区域中的水头变化甚微,可见坝建基面上扬压力变化甚微,即主排水幕的深度可适当减少,如取 20 m。工况 7 和工况 8 计算表明,排水孔孔径和孔距在合理范围内的变化对坝基等水头线的分布影响也不明显。限于篇幅,仅给出工况 7 的渗流场水头线分布(图 5(b)),说明在本工程中排水孔径和孔距可适当取大些。

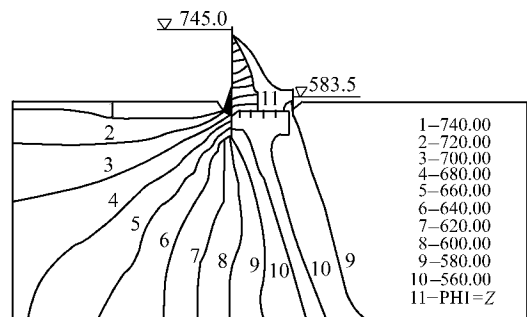
2.2.5 坝基排水设施部分失效时的渗流分析

若坝基抽排水幕都处于正常工作状态,而大坝上、下游面坝基帷幕后的主排水幕失效(工况 11,结果如图 6(a))。与工况 2 相比,坝基岩体等水头线分布变化不大, F_1 断层仍起“渗流边界”性控制作用,但紧靠失效主排水幕的抽排水幕的作用得到了明显加强,它与连通于 F_1 断层的第 2 道抽排水幕共同有力地控制坝建基面上的扬压力。渗流场中第 10 号水头值为 560 m 的等水头线被挡在了抽排水幕的外侧,坝建基面中间坝段区的扬压力水头小于 $560 \text{ m} - 555 \text{ m} = 5 \text{ m}$,仍能满足设计扬压力要求(图 1(a))。

坝基上、下游防渗灌浆帷幕均失效时(工况

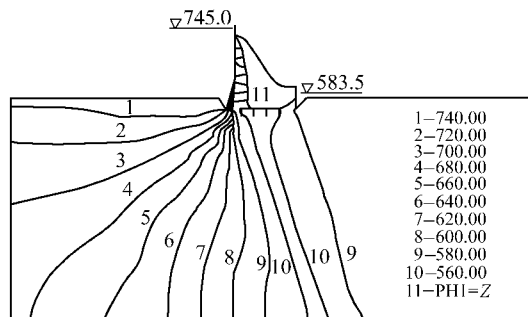


(a) 工况6

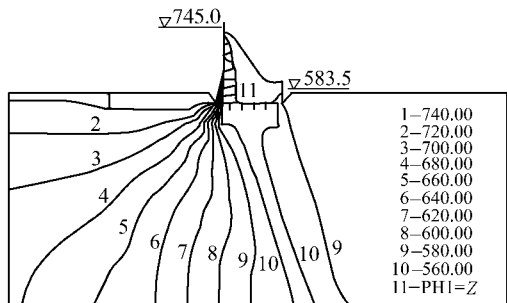


(b) 工况7

图5 排水幕的排水降压效果等水头线分布(单位:m)
12),由于坝基上、下游面主排水幕的强排水作用,其对渗流场等水头线分布的影响较小(图6(b)),对坝建基面上扬压力的影响更小,可见在某种程度上坝基防渗帷幕的设置可降低渗过坝基的渗流量,但大坝渗流场水头及坝建基面扬压力的控制还得借助于合理设置坝体坝基中的排水降压设施。



(a) 工况11



(b) 工况12

图6 坝基部分排水设施失效时等水头线分布(单位:m)

3 结 语

a. 现拟渗控方案是可行的,但设计扬压力图形

过于保守。

b. 坝基断层 F_1 和位于其上的第2道抽排水幕形成了强渗水通道,形成了渗流场中的一个渗流控制性“边界”,必须保证第2道抽排水幕长期的排水通畅性。同时,这道排水幕可以伸入 F_1 断层一定深度。

c. 坝基抽排水幕和主排水幕的深度可设置得浅一些,建议坝基中间抽排水幕的深度取8m,主排水幕的深度取20m。坝基和坝体内的排水孔孔距可比渗控方案的大一些,孔距可取4~5m,孔径在可能取值范围内的变化对大坝渗流场影响不明显,可取20cm。

d. 坝基防渗帷幕的防渗作用主要取决于帷幕与周围岩体的相对不透水性,而不是帷幕的厚度和深度。帷幕的相对渗透性愈小,防渗效果就愈显著。坝基防渗帷幕的强防渗功能应借助于其后排水孔排水幕的合理设置来实现。

参考文献:

- [1] 朱岳明,陈振雷,陈晴,等.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,1994(4):15~20.
- [3] 张燎军,朱岳明.二滩水电站基础三维渗流场分析[J].河海大学学报(自然科学版),2001,29(1):59~64.
- [4] 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.
- [5] 朱岳明.裂隙岩体渗流研究述评[J].水利水电科技进展,1991,11(1):16~25.
- [6] Ewert F K. Rock grouting with the emphasis on dam sites[M]. Springer-Verlag,1986.

(收稿日期:2003-12-23 编辑:骆超)

· 简讯 ·

一种新的水轮机推力轴承瓦面材料——PTFE

立轴水轮发电机装备有推力轴承,支承着机组旋转部分的重量以及水的推力载荷。对于其固定的轴承瓦面(静止滑动面)材料,过去常采用WJ2轴承合金,现在则代之以聚四氟乙烯(PTFE)树脂系列材料。具有以下特点:①轴承的寿命长,维护量小,磨损量仅为WJ2的1/50,不会发生与合金剥离的现象,无烧结现象;②由于轴承的小型化,可减少损耗(约20%),提高了使用效率;③起动摩擦系数小(为WJ2轴承的1/3),勿需设置油压起重器,勿需顶油膜的操作,可节省设备,使用、维护简单;④滑动面材料为电气绝缘层,结构合理,勿需轴绝缘;⑤滑动面材料也是隔热层,改善特性,热变形小。(邓隐北供稿)