

1 坝基渗流场有限单元法求解

本次研究工作的重点是论证坝基的渗流特性和优选渗控设计方案.在渗流场计算时,当不考虑 F_6 断层的影响时,视过坝体和坝基排水孔中心和过两相邻排水孔中面的坝上下游向垂直于坝轴线的横剖面均为渗流对称面,亦即隔水层面,因此渗流计算域在坝轴线方向(y 轴方向)的厚度仅为 1.5 m,其中 $y = 0$ m 和 1.5 m 两剖面分别为过排水孔中心和相邻两排水孔中面的横向垂直截面,计算域中每道排水幕只含有半个排水孔.坝基计算域最上游垂直面、最下游垂直面和底部水平面分别到坝踵、坝趾和坝建基面的距离均为 6 号坝段坝建基面宽度 101.49 m 的 2.5 倍.当考虑 6 号坝段坝基 F_6 断层的渗流影响时,计算域坝轴线向厚度为 36 m,其中坝基每道排水幕有排水孔 12 孔,共有 36 孔.因计算域也包含了坝下游面部分山坡体,以及坝基排水幕中的排水孔全为溢流型排水孔,坝基渗流场的求解颇为复杂,为一个含有渗流自由面和溢流型排水孔的边界非线性渗流问题.对于这个问题的求解需要用文献 [1, 2] 所介绍的固定网格求解无压流渗流场的结点虚流量法,用排水子结构技术来模拟排水孔的实际排水降压渗流行为^[2, 3],其中需用排水孔开关器^[4]来准确甄别和模拟坝基溢流型抽排水幕的工作状态和实际排水情况.图 2 是计算域厚度为 1.5 m 时单元网格的剖分结果,共有 3640 个单元和 4988 个结点,绝大部分为空间六面体 8 结点单元,少数为空间五面体 6 结点边界填充单元.

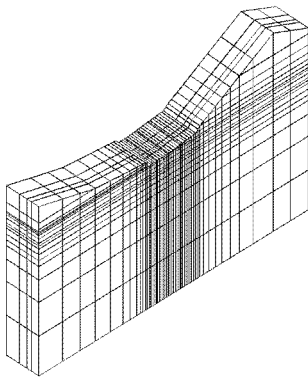


图 2 坝基渗流场计算域及单元剖分形式

计算中坝基各区岩体渗透系数的大小严格按现场压水试验的透水率进行换算,当考虑岩体的渗透各向异性时,假定岩体节理面切向和法向两个主渗透系数的各向异性比为 5,防渗帷幕的渗透系数取为 1×10^{-5} cm/s.计算坐标的定义为: x 轴的零点坐标取在坝踵处,向下游为正; y 轴指向左岸; z 轴零点取在零点高程处,向上为正.

对于一个有自由面的达西渗流问题,结点虚流量法的有限单元法迭代格式为^[2]

$$Kh = Q - Q_2 + \Delta Q \tag{1}$$

式中: K 、 h 和 Q 分别为计算域 Ω 的总传导矩阵、结点水头列阵和结点等效流量列阵, $\Omega = \Omega_1 + \Omega_2$, Ω_1 和 Ω_2 分别为位于渗流自由面以下的渗流实域和渗流自由面以上的渗流虚域; Q_2 为渗流虚域结点等效流量列阵; ΔQ 为渗流虚域中虚单元和过渡单元所贡献的结点虚流量列阵; $\Delta Q = K_2 h$.

2 坝基渗流特性分析

2.1 坝基地质条件及其渗流特性

大坝建在相对不透水的 $\beta_{\mu 4}^{-1}$ 辉绿岩脉上,而贴近坝踵上游面和坝趾下游面即为强透水性的 D_3L^3 和 D_3L^4 榴江组硅质岩,且有较深的蚀变现象,会加大坝建基面上的扬压力.因岩层倾向坝下游面,平均倾角 57° ,坝上游面防渗帷幕处相对不透水辉绿岩岩层垂直向的厚度只有 45 m,下方正好是 D_3L^3 岩层的蚀变区,一旦防渗帷幕或排水幕穿透辉绿岩岩层,可能会对坝建基面或坝基浅层乃至深层滑裂面的抗滑稳定不利.若将防渗帷幕穿过 D_3L^3 岩层,则防渗帷幕的深度将需要达到 100 m,很不经济,而且有无这个必要也需要从渗流特性和渗控效果方面进行论证.带宽达 3~5 m 的强透水性 F_6 断层横穿坝基,虽然在坝建基面有深约 10 m 的倒梯形状混凝土置换体,但 F_6 断层直接连通于库水,它对坝建基面扬压力大小的影响也是工程设计中甚为关心的问题之一.坝基岩层倾角较大,而且倾向于坝下游面,当水库蓄水后,这些节理面可能会产生水力劈裂现象,成为强渗流途径,甚至会出现库水满水头压力直接作用在裂隙节理面上的现象.在岩体中,岩层节理面切向的渗透能力一般较层面法向的大得多,压水试验的透水率主要也就是反映岩层节理面切向的渗透能力,渗透水流沿岩体层面切向渗动时所受到的渗透水力阻力一般会很小,有时甚至可以忽略不计,百色坝基岩体的这种渗透各向异性的特性也是很明显的,有可能会加大坝建基面上尤其是坝踵区岩层层面上的扬压力.值得指出的是,当这种渗透各向异性足够大时,同样坝踵区岩层节理面上所受到的渗透水压力也会达到库水满水头压力值,而并不需要节理的张裂.

2.2 F_6 断层对坝基渗流场的影响

坝基防渗帷幕深取 40 m,不穿过坝基持力层辉绿岩岩层,幕后的 3 道排水幕正常工作,每道排水幕在 F_6 断层带 10 m 深混凝土置换体下都有 1 个排水孔,孔深与同一排水幕中的邻孔孔深相同.当坝体承受

上游库水位为 228 m 的 50 年一遇洪水时,坝基渗流场的等水头线分布如图 3 所示。在排水幕和防渗帷幕作用下,坝上下游总水头差几乎完全消耗在防渗帷幕上,似以“面力”形式作用在帷幕上,帷幕上下游面承受着巨大的水头压力差。绕过帷幕底部的水头能量较均匀地损耗在坝基正下方的深层岩体中。

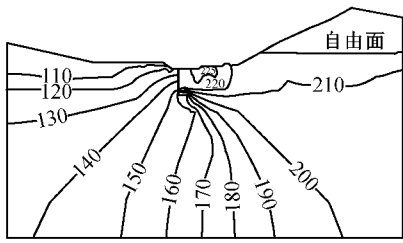


图 3 考虑 F_6 断层影响时坝基等水头线分布(单位:m)

如果假设坝基 3 道排水幕中所有位于 F_6 断层带中的排水孔完全失效,即 F_6 断层中不设排水孔,而计算域中其余的排水孔正常工作,坝基渗流场等水头线基本与图 3 一致,即位于 F_6 断层中的排水孔失效,对坝基渗流场的水头分布没有明显的影响。这与断层带贯穿于整个坝基的上下游范围有关,因为坝基等水头线分布主要取决于剖面上各岩区的相对透水能力,与岩体的绝对透水能力无关。但 F_6 断层带为相对透水岩带,在相同的坝轴线向厚度内,渗过断层的渗流量较别的地方大,因此在坝踵区对 F_6 断层进行较深的灌浆封堵处理是必要的。

2.3 上游蚀变带岩体对坝基渗流场的影响

当防渗帷幕及排水帷幕正常工作时,分以下两种情况来考察蚀变带岩体的处理对坝基渗流特性的影响程度:①对上游蚀变带岩体作固结灌浆处理,深为 20 m,蚀变岩体沿层面开裂深度达 30 m;②对上游蚀变带岩体作固结灌浆处理,深为 30 m。坝基渗流场等水头线分布分别如图 4 和图 5 所示。

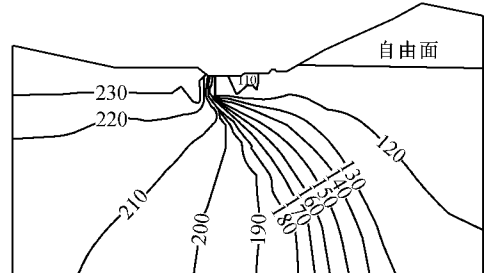


图 4 上游蚀变带岩体固结灌浆深 20 m 时坝基等水头线分布(单位:m)

由图 4 可以看出,由于蚀变带的开裂,坝上游面蚀变带岩体的处理不能起到阻渗的作用,开裂区岩体成了渗透各向异性,层面切向为主渗透方向。单就防渗效果而言,坝踵固结灌浆处理没有特别的工程意义。而对坝基扬压力的控制重点是确保坝基排水

幕的排水畅通性。

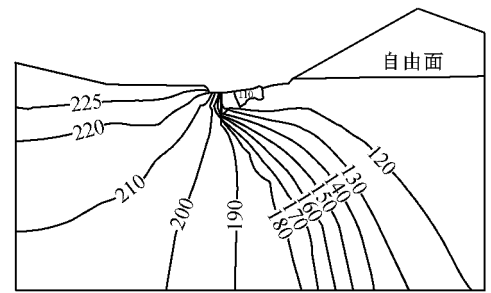


图 5 上游蚀变带岩体固结灌浆深 30 m 时坝基等水头线分布(单位:m)

将图 4 与图 5 比较,不难看出在宏观上坝基渗流场的特性没有什么变化,30 m 开裂深度只对坝踵上游面局部区域中的水头分布有影响,对坝建基面下方的渗流场水头分布结果没有明显的具有工程意义的影响,这主要是排水孔的强排水降压作用所致。

另外,防渗帷幕的作用主要是降低排水幕附近岩体中的渗透水力梯度,防止发生渗透变形破坏,而不是用来直接降低坝基扬压力,因此防渗帷幕和排水幕可以布置得浅一些。事实上,图 3~5 中防渗帷幕所表现出的强防渗作用现象不是单靠帷幕自身的相对抗渗性获得的,而是由帷幕后排水幕的排水作用所导致。一旦失去排水幕的排水降压作用,帷幕的这种强防渗作用就会立即消失。因此,坝基防渗帷幕实质上是依赖于其后排水幕的存在而存在的。防渗帷幕的真正作用在于减小坝基渗流量和防止排水孔周围岩体出现渗透变形。就本工程而言,合理帷幕深度约 35 m,甚至可以再小一些,比如 30 m,但防渗帷幕的深度应比主排水幕的深,以防排水幕底部岩体发生渗透变形。

2.4 成层岩体对坝基渗流场的影响

本工程将坝基沉积岩强风化区、破碎带及辉绿岩按各向同性渗透介质考虑,而弱风化沉积岩法向透水率为切向的 1/2,微风化沉积岩法向透水率仅为切向的 1/5。经过理论推导,岩体相应的渗透系数张量为

$$k = k_n \begin{bmatrix} r \cos^2 \theta + \sin^2 \theta & 0 & 0.5(1-r) \sin 2\theta \\ 0 & r & 0 \\ 0.5(1-r) \sin 2\theta & 0 & r \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: k 为各区岩体的渗透系数张量; r 为岩体沿层面切向与法向两个主渗透系数之间的渗透各向异性比; k_n 为各岩区层面的法向主渗透系数; θ 为岩层倾角。

计算所得的坝基渗流场等水头线分布如图 6 所示。因岩体顺层面方向透水能力相对大,渗透水头能

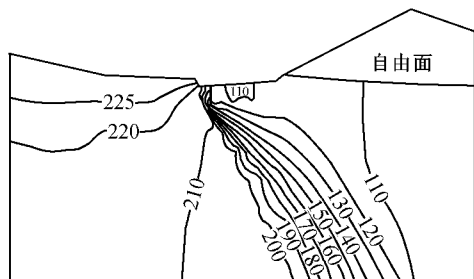


图6 考虑成层岩体影响坝基等水头线分布(单位: m)

量主要损耗在层面法向的渗径上,几乎整个坝踵上游区水头损失都很小,水头等值线主要集中在坝建基面下方的岩体中,此时岩层层面法向所受的渗透压力很大,对基岩的稳定不利,有时甚至会极不利,因此在坝基岩体的深层抗滑稳定分析中一定要考虑这一现象.除局部区域外坝基扬压力水头要较各向同性时结果反而小一些,但坝趾区略大一些.由于未考虑坝踵区的开裂,坝踵区坝基扬压力水头要略小一些.与各向同性时相比,由于排水幕的作用,宏观上坝建基面上的扬压力大小基本没有变化(见图7和图8),但此时渗流量猛增.

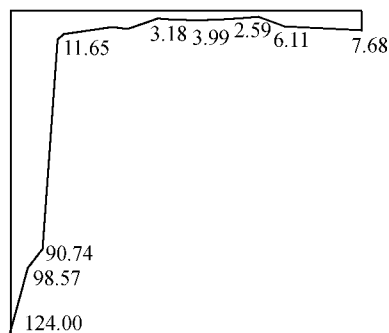


图7 岩体各向同性时坝建基面上的扬压力水头分布(单位: m)

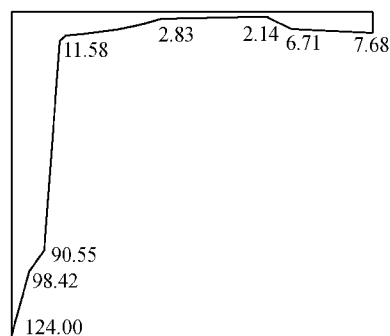


图8 岩体各向异性时坝建基面上的扬压力水头分布(单位: m)

3 结 论

a. 从坝基渗流场水头分布的变化来看,百色大坝坝基应采用“前堵后排”渗控设计思想.建议坝基主防渗帷幕的深度仅为30~35 m,主排水幕深为20 m,副排水幕深为8 m.

b. F_6 断层对坝基渗流特性的影响不是很明显,

断层贯穿于整个坝基的上下游,自身获得了良好的渗流通畅性.就该断层处理,宜在坝踵区作深防渗灌浆,以减小渗流量,降低扬压力.若 F_6 断层中出现滞水现象,则会加大坝建基面上的扬压力,因此在断层中坝踵防渗帷幕后应设置排水孔.

c. 坝基渗流场的水头损耗主要集中在坝建基面下方的岩体中,且等水头线顺岩体层面方向分布,在考虑岩体各向异性时这种现象更加突出.建议在坝基深层抗滑稳定分析时需考虑这种现象,并且还要考虑坝踵区蚀变带岩层会被拉裂的可能.

d. 从渗控效果来看,坝上游面蚀变带岩体无须进行固结灌浆处理,因为这种处理无明显的工程渗控意义,而且固结灌浆处理对防止岩层拉裂也无工程意义.

e. 当防渗帷幕失效时,坝建基面上的扬压力仍能得到很好的控制,但此时排水幕周围岩体的渗透水力梯度会大幅度地增大,渗流量也会大大增加.而当坝基排水幕完全失效时,即使岩体中防渗帷幕完好未损,坝建基面上的扬压力与设置任何渗控措施时的情况相比较,几乎相同.

f. 由于排水幕的强排水作用,在主排水幕下游区坝建基面上的剩余扬压力水头主要是受相应坝基排水廊道底板高程处的排水孔顶面的排水溢出高程所控制.为了降低坝建基面上的静水浮托力,排水孔的顶端自溢式排水高程应尽可能布置得低一些.

参考文献:

- [1] Zhu Yue-ming, Wang Ru-yun, Xu Hong-bo. Some adaptive techniques for solution of free surface seepage through arch dam abutments[A]. Xia Song-you. Proc The Intern Symp on Arch Dam[C]. Nanjing: Hohai University Press, 1992. 613 ~ 618.
- [2] 朱岳明, 陈振雷, 陈晴, 等. 求解地下洞室群区复杂渗流场的改进排水子结构法[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, 19(3): 69 ~ 76.
- [4] 朱岳明, 钱敏, 徐惠民. 长江三峡碾压混凝土坝方案厂房坝段渗控方案分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(2): 1 ~ 6.

(收稿日期: 2004-01-06 编辑: 骆超)

