

拉西瓦水电站坝基软弱断层的渗流及防渗

刘善利, 赵 坚, 沈振中

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 对岩体中存在许多软弱断层(如 F_{172})的拉西瓦水电站坝基渗流场进行了研究,通过对断层、周围岩体及防渗帷幕等各种相关量性质变化,计算并比较其防渗措施前后坝体各部分渗透流量及帷幕内最大渗透坡降。结果表明:对于贯穿坝体上下游、处在坝基关键部位、渗透各向异性且有着强透水路径的断层应进行封堵,并且采取帷幕灌浆、排水反滤等有效措施以保证坝体的稳定性。

关键词 岩体 软弱断层 坝基渗流 有限单元法 拉西瓦水电站

中图分类号 :TV223.4

文献标识码 :A

文章编号 :1006-7647(2007)04-00055-05

Seepage analysis and anti-seepage study on weak faults of dam foundation at Laxiwa Hydropower station//LIU Shan-li, ZHAO Jian, SHEN Zhen-zhong(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : With Laxiwa Hydropower Station taken as an example, the seepage field of the dam foundation with many weak faults (such as F_{172}) in rocks was studied. By analysis of the variation of properties of faults, surrounding rocks, and anti-seepage curtains, the seepage quantity of each part of the dam body and the maximum hydraulic gradient in curtains before and after the adoption of anti-seepage measures were calculated and compared. The results show that the faults, which run through the upstream to downstream of the dam body and is located at the key parts of the dam foundation and characterized by seepage anisotropy and powerful penetrating channels, should be plugged, and the measures, such as curtain grouting and inverted filter, should be taken to ensure the stability of the dam body.

Key words : rock mass ; weak fault ; seepage of dam foundation ; finite element method, Laxiwa Hydropower Station

大坝建成蓄水后,会引起坝基渗流和两岸地下水雍高并出现绕坝渗流等现象。坝基渗流和绕坝渗流不仅会改变原地下水的渗流路径,而且会增加岩体裂隙中的水压力。若在坝肩和坝基岩体中,存在不同力学属性又互相切割沟通的结构面,则这些结构面可能会成为高水头承压面,甚至形成集中渗流通道。在高水头的作用下,岩体变形特性、强度特性和渗透性都会有不同程度的改变,其中软弱断层的水力特性改变趋势值得引起注意。在高坝坝基中存在的强透水性软弱断层,可能对整个坝基渗流场影响很大。在高水头作用下,软弱断层将承受很大的渗透作用,其结构面会因此进一步变化,甚至可能产生机械潜蚀。软弱面特性的改变也会不同程度地对原位岩体的强度、变形性能、渗透各向异性、力学上的连续性以及岩体中应力的分布等产生影响^[1]。在长期渗透压力作用下,软弱断层自身的性质会受到两种影响。一是渗透稳定性。地下水作为一种力,对岩体产生挤压破坏,对岩体中的裂隙产生扩展劈

裂破坏^[2],软弱断层的渗水通道主要类似于构造裂隙,渗压水流通过时,既有冲刷作用,也有淤塞现象,也可能发生溶蚀,从而使岩体稳定程度受到影响。二是存在泥化带扩大的可能性。地下水在软弱断层的渗流过程中对软弱岩体及结构面的物理化学作用,使岩体的物理力学性质减弱,如使软岩产生膨胀变形,造成内部岩石泥化,对岩石产生软化作用^[3]。研究^[4]表明:与泥化错动带相邻的劈理带,由于结构受到较严重的构造破坏,裂隙及微裂隙极为发育,易于吸水膨胀。特别是水的化学类型变化时,更易于使其结构破坏,强度也随之显著降低,有促使泥化带向劈理带逐步扩展的趋势。另外,随着水压力的增加,软弱断层的渗透系数及渗流量会增大^[2],更会增加软弱断层潜在的危险隐患。国内有很多学者对软弱层性质及采取的工程措施进行了研究,文献^[5]针对云龙水库大坝右岸下部有规模较大、顺河床断层且坝址区地质条件复杂的特点,对其防渗帷幕设计进行了介绍。文献^[6]针对溪洛渡水电站坝址区岩

体层内错动带进行了原位渗透特性研究,并对影响层内错动带临界坡降、破坏坡降、渗透系数的因素及渗透变形过程进行了分析。文献[7]针对软弱坝基的主要工程地质问题,结合面板堆石坝的实际情况,采取了相应的防渗加固处理措施。文献[8]在细致模拟溪洛渡高拱坝坝址区层内错动带空间展布和连通特征的基础上,定量分析了层内错动带的变形和超载破坏规律,重点对比分析了不同高程层间错动带的相对变形,评价其对坝体稳定性的影响。

本文结合拉西瓦水电站,对具有软弱层地层的高坝坝基渗流场特性进行分析,以软弱断层对坝稳定性造成的影响为主要研究对象,建立有限元模型进行计算,并讨论对软弱断层渗控方案的效果。

1 工程概况

拉西瓦水电站是黄河上游龙青段的第二个梯级电站,位于青海省贵德县与贵南县交界的龙羊峡谷出口段,设计正常蓄水位 2 452.00 m,总库容 $10.56 \times 10^8 \text{ m}^3$,总装机容量 4 200 MW,保证出力 958.8 MW,多年平均年发电量 $102.33 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,为黄河上规模最大的水电站。高坝位于伊黑龙断层(F_1)和拉西瓦断层(F_2)围限的断块内,主要地质特点为:①两断层相向倾斜,总体呈单斜构造,走向 $\text{NE}25^\circ \sim 40^\circ$ 、倾向 SE、倾角一般 $25^\circ \sim 35^\circ$;②岩层受构造变动、岩浆侵入及断层错动的影响,产状多变;③断裂构造以中陡倾角者居多,缓倾者次之;④泥岩及顺河向断层的渗透性强;⑤两断层沿坝上下游向贯穿整个基坝,透水能力大,对坝基扬压力控制不利;⑥软弱断层 F_{172} 直接连通于库水,可能会成为影响坝建基面扬压力大小的因素。

以上特点表明该坝基所处的地质条件十分复杂,存在多个对坝安全性有不利影响的条件。如因基岩的结构层状明显,节理面切向的渗透能力一般较层面法向大得多。岩层中的节理面可能会产生水力劈裂现象,成为强渗流途径;渗透各向异性突出,坝基的渗流特性也有别于其他工程;高水头的作用容易使软弱断层产生泥化软化,再加上软弱断层以中陡倾角者居多,较高的孔隙水压力使斜坡岩体沿已泥化的软弱断层转移失稳,形成岩体上顺层转移的基岩滑坡或地质变形。因此,研究断层等软弱带在高水头作用下的渗透特性,将有助于选择有效的渗流控制方案。

2 计算模型及工况

根据对该坝地质特点分析,由于所给的地质勘探资料中没有提供计算域内所有裂隙的各种参

数,如宽度、长度、充填情况等,基于土体的渗流理论,将岩体裂隙的渗透特性概化为岩体的渗透张量,采用等效连续介质模型。计算方法采用三维渗流有限元方法,有限元计算采用固定网格法,利用基于变分不等式的‘截止负压法’^[9]进行渗流场的迭代求解,建模方法采用‘控制断面超单元有限元网格自动剖分法’^[10],形成分析研究坝基三维渗流场的有限元计算网络模型。有限元模型的主要内容有:

a. 断层 F_{172} 的模拟。根据地质资料,在建基面基坑上游边向上 17 ~ 20 m 处有 F_{172} 断层通过,在距坝体上游边约 5 m 处的坝基内垂直通过河床,在坝基下埋深约 90 ~ 116 m,横穿河床, F_{172} 断层产状 $\text{NW}280^\circ \sim 320^\circ$, SW 或 NE,以 $60^\circ \sim 70^\circ$ 倾角倾向下。 F_{172} 断层在河床段宽 1.5 m,影响带宽 1 ~ 2 m,断层处于受拉部位。根据等效连续介质理论,将该断层等效成宽度为 3.0 m、渗透性为各向异性的连续介质体。 F_{172} 断层由坝上游倾向下,渗透性依断层结构面呈明显的各向异性。根据断层产状,计算坐标系下的渗透张量为

$$K = T^T K' T \quad (1)$$

式中: K' 为主渗透方向的渗透张量; T 为旋转矩阵。通过张量运算和坐标变换求出断层 F_{172} 的渗透系数张量矩阵 k_1 (单位: cm/s) 为

$$k_1 = \begin{bmatrix} 3.089 \times 10^{-7} & 2.199 \times 10^{-9} & 4.674 \times 10^{-8} \\ 2.199 \times 10^{-9} & 2.256 \times 10^{-7} & -4.641 \times 10^{-8} \\ 4.688 \times 10^{-8} & -4.641 \times 10^{-8} & 2.811 \times 10^{-7} \end{bmatrix} \quad (2)$$

b. 岩体渗透性的模拟。根据地质勘测资料和已有研究成果,将坝址区岩体按浅部 ($l < 80 \text{ m}$) 和深部 ($l > 80 \text{ m}$) 分区。 l 为离地面的竖直高度,其渗透系数张量 k_2, k_3 (单位: cm/s) 分别为

$$k_2 = \begin{bmatrix} 2.359 \times 10^{-7} & 1.697 \times 10^{-9} & 3.576 \times 10^{-8} \\ 1.697 \times 10^{-9} & 1.723 \times 10^{-7} & -3.533 \times 10^{-8} \\ 3.576 \times 10^{-8} & -3.533 \times 10^{-8} & 2.137 \times 10^{-7} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$k_3 = \begin{bmatrix} 3.089 \times 10^{-8} & 2.199 \times 10^{-10} & 4.674 \times 10^{-9} \\ 2.199 \times 10^{-10} & 2.256 \times 10^{-8} & -4.641 \times 10^{-9} \\ 4.688 \times 10^{-9} & -4.641 \times 10^{-9} & 2.811 \times 10^{-8} \end{bmatrix} \quad (4)$$

c. 边界条件模拟。计算模型中边界类型主要有已知水头边界、出渗边界、不透水边界 3 种:①已知水头边界包括坝区上下游水位淹没线以下的给定水头边界,以及给定地下水位的截取边界;②出渗边界为坝区下游侧左、右岸山坡的背水面;③不透水边界包括模型底面以及模型上下游左右两侧截取

边界。

d. 模型规模。在综合分析计算区域内的地形、岩层、地下洞室结构等特征的基础上,形成有限元计算网格结点总数 36 558,单元总数 34 024。同样将断层的位置模拟到整体模型中,整体模型如图 1 所示。

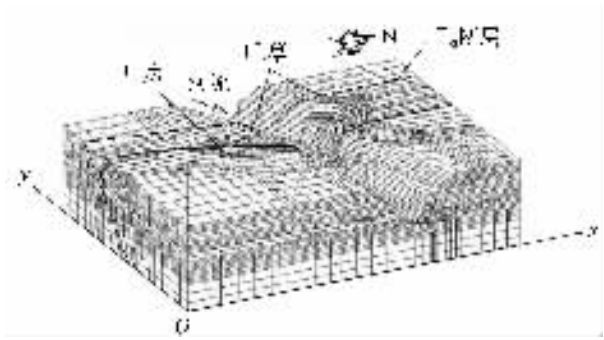


图 1 整体模型有限元网格

e. 渗流量计算方法。对于任意 8 结点六面体等参数单元(图 2),通过某断面 S 的渗流量可按式(5)计算:

$$q = - \iint_S k_n \frac{\partial h}{\partial n} dS \tag{5}$$

式中: S 为过流断面; n 为断面正法线单位向量; k_n 为 n 方向的渗透系数张量; h 为渗流场水头。选择中断面 $abcd$ 作为过流断面 S ,并将 S 投影到 yOz 、 zOx 、 xOy 平面上,分别记为 S_x 、 S_y 、 S_z ,则通过单元中断面的渗流量为

$$q = - k_x \frac{\partial h}{\partial x} S_x - k_y \frac{\partial h}{\partial y} S_y - k_z \frac{\partial h}{\partial z} S_z \tag{6}$$

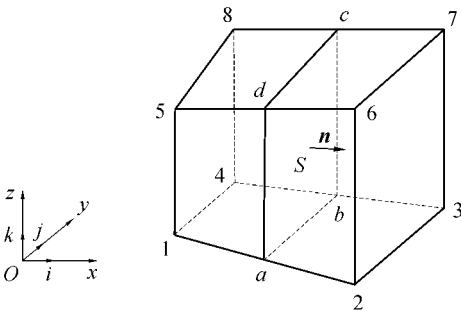


图 2 8 结点六面体单元渗流量计算示意图

f. 最大渗透坡降计算方法。计算渗流区中,渗透坡降由公式 $J = - \frac{\Delta H}{\Delta s} = \frac{\Delta h}{\Delta L}$ 求得,式中 Δh 表示渗流水头损失, ΔL 表示流线径长。

g. 计算工况。根据分析需要的情况,以正常水位(水库运行期上游水位取正常蓄水位 2 452.00 m,下游水垫塘水位 2 243.50 m,下游河道水位 2 238.71 m)为基本水力条件,考虑断裂带渗透性不同、裂隙岩体渗透性变化和防渗帷幕渗透系数变化,拟定表 1 所示工况进行分析。

表 1 工况说明及计算结果

工况 编号	工况说明	渗透流量/(m ³ ·d ⁻¹)			坝肩帷幕 内最大 渗透坡降
		坝基	右坝肩	左坝肩	
1	模型中不存在断层	603.2	390.8	180.5	13.500
2	不设帷幕	817.8	423.4	221.6	
3	设置帷幕防渗措施	291.1	158.6	100.2	10.480
4	F ₁₇₂ 断层处坝基帷幕 局部失效	429.6	163.5	98.0	11.670
5	K _段 = 5 k _{3断}	306.2	176.5	101.4	9.500
6	K _段 = 10 k _{3断}	311.3	180.6	104.9	11.010
7	K _岩 = 0.2 k _{3岩}	163.0	84.1	41.1	10.200
8	K _岩 = 10 k _{3岩}	477.1	415.9	167.3	14.200
9	K _帷 = 5 k _{3帷}	582.2	276.0	168.3	3.493
10	K _帷 = 10 k _{3帷}	817.0	423.1	221.2	1.020

注 工况 3~10 基本条件同工况 2,不同之处在于对帷幕、断层、岩体的渗透系数发生变化;工况 4~10 的参数均在工况 3 的基础上发生变化, $k_{3断}$ 、 $k_{3岩}$ 、 $k_{3帷}$ 分别为工况 3 断层、岩体、帷幕的渗透系数。

3 计算成果分析

3.1 渗流场特性分析

3.1.1 F₁₇₂断层对渗流场的影响

模型中存在断层 F₁₇₂时自由面地下水等值线见图 3,从表 1 工况 1 和工况 2 的数据可以看出,天然状态下由于断层 F₁₇₂ 贯穿于坝上下游,坝基、右坝肩、左坝肩的渗透流量分别比模型中不存在断层的情况增加了 35.6%、8.3%、22.8%,其原因在于考虑了断层的强透水性。为了比较模型中存在与不存在断层 F₁₇₂时上游水位不同的情况,取上游局部区域等值线,如图 4 所示。由图 4 可以看出,上游侧各点的水头出现较大幅度的降低,这是由于断层的透水特性使水流在此形成汇聚,引起坝基上游水位下降而使得上游各点水头减少。

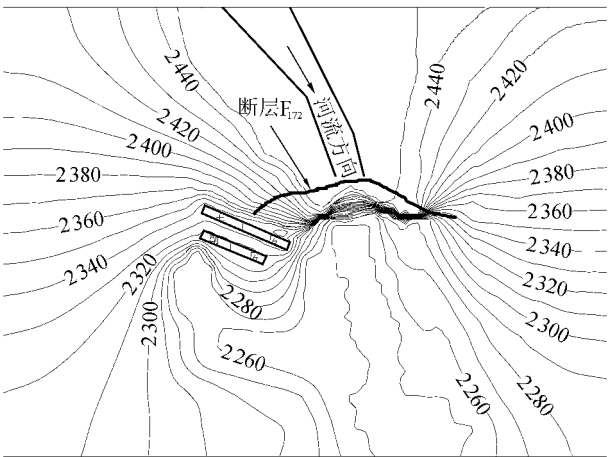
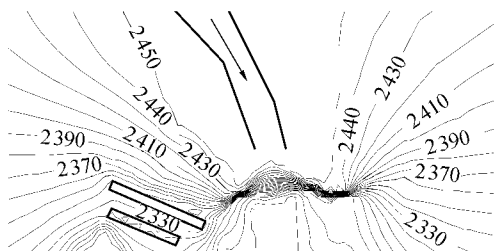


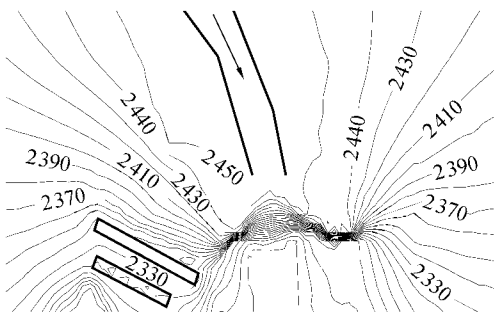
图 3 模型中存在 F₁₇₂断层自由面地下水等值线(单位:m)

3.1.2 F₁₇₂断层渗透性对渗流场的影响

a. F₁₇₂断层处坝基帷幕局部失效与否对渗流场的影响。比较设置帷幕防渗措施(工况 3)和 F₁₇₂断层处坝基帷幕局部失效(工况 4)两种工况,从表 1 中可



(a) 模型中不存在 F_{172} 断层



(b) 模型中存在 F_{172} 断层

图4 局部自由面地下水位等值线(单位: m)

以看出,当 F_{172} 断层处的坝基帷幕局部失效时,坝基渗流量比工况3增大47.6%。经计算帷幕后坝基平均扬压力比工况3增加约6%。由此可见,帷幕对断层的封堵作用十分明显,一旦此处帷幕失效,就可使断层成为集中渗漏通道,从而使渗漏量明显增加。

b. F_{172} 断层渗透系数变化对渗流场的影响。对 F_{172} 的渗透系数进行变化以进行渗透敏感性分析,由于 F_{172} 断层带为相对透水岩带,渗透系数的变化导致渗透性变化进而渗流量发生变化。随着 F_{172} 断层渗透系数的增大,坝体各部分的渗流量也相应增大。同样随着断层的渗透系数增大,使得帷幕承受的水头压力也相应增大,导致渗透坡降也增大。从表1可以看出,当主要断层 F_{172} 的渗透系数 $K_{\text{段}} = 5k_3$ 断时,通过坝基、右坝肩和左坝肩的渗流量比工况3分别增加了约5%,11%,1%;当主要断层 F_{172} 渗透系数 $K_{\text{段}} = 10k_3$ 断时,通过坝基、右坝肩和左坝肩的渗流量比工况3增加了约7%,13%,5%。前者渗透坡降为9.500,后者为11.010。随着坡降的增加容易使帷幕达到允许渗透坡降而导致渗透破坏。

3.1.3 F_{172} 断层周围岩体渗透性对渗流场的影响

由计算得到的坝基和坝肩的渗流量分析可知,岩体渗透性对渗流场的影响很大。当岩体的渗透系数为工况3的20%时(工况7),通过坝基的渗流量为工况3的56%,通过右岸和左岸坝肩的渗流量分别为工况3的53%,41%;当岩体的渗透系数为工况3的10倍(工况8)时,通过坝基渗流量是工况3的160%,通过右岸和左岸坝肩的渗流量分别是工况3的260%,167%。即 F_{172} 断层周围岩体的渗透系数发生变化时,对整个渗流场的影响较 F_{172} 本身渗透性变化的影响要显著。岩体渗透性变化实际导致了帷幕的阻水作用发生变化。当岩体渗透性较小时防渗帷幕的阻水作用减弱;由于防渗帷幕相对于岩体来说占有的面积很小,这时周围岩体与防渗帷幕作为共同的防渗体系,防渗效果比较明显。当岩体渗透系数增大时,可以突显帷幕的阻水作用,水头差的能量大部分消耗在防渗帷幕上,增大了帷幕降低水头值的效果,因而,帷幕内的渗透坡降也随之增大。所以为了保证渗透安全,在对整个渗流场的渗控中要考虑 F_{172} 断层和周围岩体的耦合作用。

3.2 渗控方案分析

3.2.1 帷幕封堵 F_{172} 断层的效果

图5为考虑 F_{172} 断层影响时设置帷幕后的坝基等水头线分布。切面位置为斜切坝段的剖面,与未设帷幕相比,设置帷幕后,帷幕前后一定范围内的流场等势线向帷幕收缩,此区域内水流坡降增大。浸润面的变化亦主要集中在帷幕前后,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’形式作用于帷幕上,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消耗在坝基正下方的深层岩体中^[11],这与断层带贯穿于整个坝基的上下游范围有关。 F_{172} 断层在帷幕处的连续通道对坝基扬压力以及帷幕渗流量影响较大。坝基帷幕对渗流场的影响主要体现在对坝基扬压力、坝基渗流量变化上,而设计的帷幕切断了 F_{172} 断层,帷幕对断层具有很好的

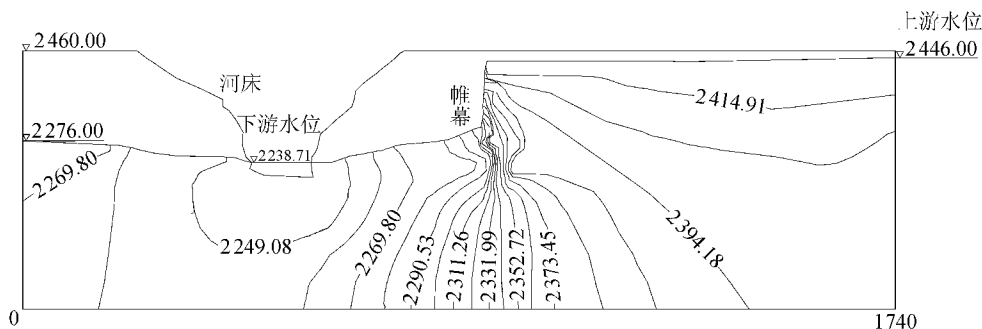


图5 考虑断层影响时设置帷幕后的坝基等水头线分布(单位: m)

封堵作用。一旦封堵作用减弱,甚至失效,幕后坝基扬压力将会显著升高。另一方面,随着坝基帷幕深度增加,坝基帷幕后的扬压力和坝基渗流量将减少,所以帷幕封堵 F_{172} 断层的效果是明显的。

3.2.2 排水孔幕效果

由于坝基前的水头压力较大,坝基虽已进行了帷幕灌浆,但是并不能完全截断渗流,设计设置了排水孔幕,以降低坝基扬压力。排水孔幕的平面布置采用交叉设计,不同高程间隔设置排水平洞,中间由排水孔连接,整个排水系统实际上是由位于不同高程的各个相对独立的排水系统构成。设计中的坝基帷幕和排水孔幕可以使地下水位在帷幕和排水前后发生集中降落,有效降低坝基内的扬压力,使地下水位发生集中降落。

3.2.3 防渗方案优化选择

a. 由表 1 的流量结果分析可知,帷幕渗透性增大,通过坝基、坝肩渗流量也随之增大。当帷幕渗透系数增至 5 倍时(工况 9),通过坝基、右坝肩帷幕部位、左坝肩帷幕部位的渗流量比工况 3 分别增大 100%, 74%, 68%。当帷幕渗透系数增至 10 倍(工况 10),帷幕渗透性与岩体接近时,即帷幕失效时,通过坝基、右坝肩帷幕部位、左坝肩帷幕部位的渗流量比工况 3 分别增大 181%, 167%, 121%。另一方面,帷幕内的渗透坡降与帷幕渗透系数的变化趋势呈反比关系。当帷幕渗透系数为工况 3 的 5 倍时(工况 9),帷幕内的最大渗透坡降为工况 3 的 $1/3$,而当其与岩体为同一数量级时(工况 10),帷幕内的渗透坡降为工况 3 的 $1/9$,与不设任何防渗排水设施的最大渗透坡降相当。可见,当帷幕渗透性减弱时,渗流水头损失主要发生在帷幕中;随着帷幕渗透性的降低,其防渗作用越明显,阻断水流作用越大。工况 3 的帷幕前断层基本失去导水作用,帷幕后断层可以帮助排泄下游山体的渗水。

b. 防渗帷幕长度、深度的影响。当坝基防渗帷幕的深度减少 20 m 时,通过坝基的渗流量比工况 3 增大 20%。当左、右岸防渗帷幕的深度减少 30 m 时,通过左、右坝肩帷幕部位的渗流量比工况 3 都增大 6%。可见,随着帷幕深度的减少,通过帷幕及坝肩的渗流量增加,改变帷幕深度对坝基的影响比两岸坝肩要明显。当左、右岸防渗帷幕的长度增加或减少 50 m 时,通过坝基和左、右坝肩帷幕部位的渗流量与工况 3 相差不大,可见帷幕长度变化对整体渗流场影响很小。

c. 通过分析,断层周围岩体的渗透性发生变化时对渗流场的影响要比防渗帷幕的系数变化对渗流场的影响显著,所以当工况 3 帷幕的布置在实际施工

中条件无法实现时,可以采取改变断层周围岩体的渗透性质来改变渗流场特性,如换填土及其他措施。

d. 坝基虽然已进行帷幕灌浆,但并不能完全截断渗流。为了收集并排走由地基渗透过来的水,进一步降低坝底扬压力,需在防渗帷幕后设置排水系统。设计采用的排水系统主要包括帷幕后的纵向排水孔幕、各高程的横向排水廊道、排水平洞、设排水结构的地下厂房系统以及水垫塘的排水孔等。等效替代排水孔幕的透水单元渗透系数 $k = 1.0 \times 10^{-3} \text{cm/s}$,两岸帷幕和排水孔幕构成上堵下排的防渗排水体系。

4 结 论

a. 本工程 F_{172} 断层的存在,其强透水路径的特性使得坝基岩体由于出现高压水流而产生增大扬压力的可能,容易使裂隙岩体发生潜蚀、管涌,破坏岩体结构,降低大坝的稳定性。

b. 在综合论证和评价了具有软弱断层坝基的渗流场特性基础上,提出封堵 F_{172} 等断层并采取帷幕灌浆的措施是必要的。

c. 考虑到 F_{172} 断层规模较大,有可能出现不均匀渗流,加上 F_{172} 断层又处于大坝的关键部位,因此在下出口区设置良好的反滤保护仍然是非常必要的。

参考文献:

- [1] 李铁汉. 岩体力学[M]. 北京:地质出版社,1980:14-15.
- [2] 张金才,张玉卓,刘天泉. 岩体渗流与煤层底板突水[M]. 北京:地质出版社,1997:72-74.
- [3] 华东水利学院. 岩石力学[M]. 北京:地质出版社,1981:72-73.
- [4] 陶振宇. 岩石力学原理与方法[M]. 北京:中国地质大学出版社,1991:21-22.
- [5] 李蜀. 云龙水库大坝防渗帷幕设计[J]. 水利规划与设计,2006(1):51-54.
- [6] 贺如平. 溪洛渡水电站坝区岩体层间层内错动带现场渗透及渗透变形特性研究[J]. 水电站设计,2003,19(2):90-92.
- [7] 赵思值,李燕辉. 面板堆石坝软弱坝基的研究及处理[J]. 四川水力发电,2004,23(1):97-102.
- [8] 周明君,张建海,赵文光,等. 层间层内错动带对溪洛渡高拱坝坝肩(基)稳定性的影响研究[J]. 水电站设计,2005,21(1):26-30.
- [9] 速宝玉,沈振中,赵坚. 求解有自由面渗流问题的截止负压法[J]. 水利学报,1996(3):22-29.
- [10] 赵坚,盛金昌,速宝玉,等. 三维有限元网格自动剖分的断面节点控制法[J]. 长江科学院院报,2000,17(4):34-37.
- [11] 朱岳明,李璟. 百色重力坝坝基复杂地质条件渗流特性分析[J]. 水利水电科技进展,2004,24(6):6-9.

(收稿日期:2006-03-24 编辑:熊水斌)