

积石峡面板堆石坝复杂渗流场有限元精细模拟

刘昌军¹, 丁留谦¹, 徐泽平¹, 蔡新合², 张顺福¹

(1. 中国水利水电科学研究院 防洪抗旱减灾研究所, 北京 100038; 2. 中国水电顾问集团 西北勘测设计研究院, 陕西 西安 710065)

摘要:运用自主研发的三维渗流有限元可视化分析软件 GWSS, 对积石峡面板堆石坝的坝体(包括面板、过渡层、排水层、堆石料等)、坝基、防渗帷幕以及泄洪洞和底孔排沙洞等结构进行了精细建模。在此基础上采用求解有自由面的改进截止负压法、隧洞子结构法和求解大型稀疏矩阵的预处理共轭梯度算法对积石峡面板堆石坝复杂渗流场进行了数值模拟。重点研究了面板和防渗帷幕联合作用下渗流场分布特征和防渗效果, 以及泄洪洞和底孔排沙洞对大坝渗流场的影响等。计算结果表明, 在正常运行条件下, 面板结合防渗帷幕能够起到很好的防渗作用, 坝体内自由面较低, 左岸底孔排沙洞和泄洪洞也起到了很好的排水作用, 大大降低了左岸山体的地下水位, 有利于大坝和岸坡的稳定。

关键词:精细模拟; 复杂渗流场; 地下洞室; 防渗效果; 面板堆石坝

中图法分类号: TV641 文献标志码: A

近年来面板堆石坝防渗结构的渗流特性和渗透稳定性广受关注, 面板和防渗帷幕组合防渗体系的防渗效果是设计部门关心的重要问题^[1-5]。面板堆石坝复杂渗流场的数值模拟也是目前水利工程数值模拟的难点问题^[6-10]。

一方面, 面板、过渡层和排水层等结构较薄, 给有限元网格剖分带来较大困难, 网格长宽比差异较大以及渗透系数差异等都给模型收敛带来困难。另一方面, 泄洪洞和底孔排沙洞等结构的排水对坝体和边坡的渗流场影响较大, 其精细模拟也是面板堆石坝渗流场求解的难点。因此对于这样多种防渗措施共同作用下的无压复杂渗流场的分析, 采用合适的数值模拟方法和数值分析软件是至关重要的。

本文联合运用了求解有自由面的改进截止负压法、管道子结构法和求解大型稀疏矩阵的预处理共轭梯度算法等渗流场求解关键技术, 对积石峡面板堆石坝复杂渗流场进行了有限元分析。重点研究了面板和防渗帷幕联合作用下渗流场分布特征及其防渗效果以及泄洪洞和底孔排沙洞对大坝渗流场的影响等。

1 渗流场求解理论及软件编制

1.1 渗流场求解的基本理论

非均质各向异性岩体稳定饱和渗流问题的控制方程为

$$-\frac{\partial}{\partial x_i} \left(k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) = 0 \quad (1)$$

式中, x_i 为坐标, $i = 1, 2, 3$; k_{ij} 为达西渗透系数张量矩阵; $h = x_3 + p/r$, 为总水头, x_3 为位置水头。

非均质各向异性介质稳定渗流的定解问题一般包含 4 种边界条件, 即已知水头边界、不透水边界、出渗面边界和自由面边界。对上述问题采用固定网格的有限元法进行求解, 根据变分原理, 求解泛函数和支配方程为

$$\Pi(h) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_i} \frac{\partial h}{\partial x_j} d\Omega \quad (2)$$

$$KP = F \quad (3)$$

式中, $\Pi(h)$ 为泛函数; K, P, F 分别为渗流实域的传导矩阵、节点水头压力列阵和已知节点压力列阵。

在有自由面的渗流场分析中,自由面的求解至关重要,文献[11]给出的改进截止负压法,解决了复杂无压渗流的求解问题。改进截止负压法能准确地考虑单元的部分饱和和非饱和作用,准确地计算单元结点外力或结点不平衡力,从而提高计算精度和收敛速度。

1.2 预处理共轭梯度算法

采用预处理共轭梯度算法(PCG)对线性方程组式(3)进行联立求解。

PCG法假设矩阵 A 被分为两个矩阵,即:

$$A = M + N \quad (4)$$

式中, M 为 A 的预条件形式,要求 M 容易倒置且尽可能与 A 相似,在PCG法中 M 必须总是对称且正定的。有关预处理共轭梯度算法的具体求解方法见文献[12]。

PCG法是在共轭梯度法的基础上,对系数矩阵进行了预处理,即减少条件数,使迭代收敛速度大大提高。由于其具有收敛速度更快和精确性更高的优点,在复杂的地下水数值计算中有着良好的应用^[12]。

1.3 隧洞子结构法

地下深埋高压隧洞或地下管道的排水、高压水头下内水外渗问题,是水利工程地下洞室群渗流场分析的难点问题。一方面地下深长管道的几何尺寸较小且混凝土衬砌较薄,给几何建模和有限元网格剖分带来一定难度。另一方面网格节点众多、管道高压充水等往往造成渗流场求解的不收敛。

笔者提出了采用子结构法模拟高压管道的排水和内水外渗问题。该方法避免了复杂高压管道群的网格剖分问题,为复杂地下洞室群和管道系统作用的渗流场求解提供了新的思路。

管道子结构法是排水子结构法的一个特例,两种方法计算原理相同,排水子结构法解决的是密集排水孔等排水系统的精细模拟问题,而管道子结构法主要是解决深埋高压隧洞(或管道)的排水或内水外渗问题。

(1) 高压管道的渗流行为。水工结构工程中存在各种形式的地下隧洞和地下管道,比如引水隧洞、尾水洞等。洞内无水时,隧洞衬砌后内壁面为逸出边界或隔水边界(取决于衬砌渗透系数和岩体渗透系数比值),无衬砌的隧洞内壁面为可能逸出边界。洞内水满时为简单的已知水头边界面,部分有水时为可能渗流逸出面或已知部分水头面。渗流行为的正确处理方法完全等同于计算域中别的同类边界条件的处理方法,只需要细致地刻画出它们在各阶段的几何形状和衬砌的工作状态就能高精度地进行数值模拟。

(2) 高压管道的子结构模式。一般地下隧洞根据边界特点可分为两类:①进行衬砌的隧洞;②不进行衬砌的隧洞。对于无衬砌的隧洞分别采用挖空处理,而对有衬砌的隧洞可采用一重子结构法进行剖分和计算,具体剖分形式见图1。

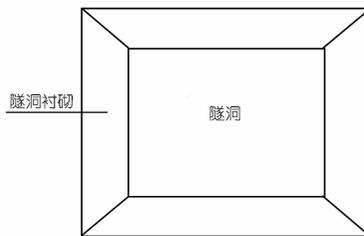


图1 隧洞横截面子结构

1.4 软件编制

在上述理论基础上,采用IDL语言编制了三维渗流有限元计算软件GWSS(Ground Water Simulation System)^[13-14]。该软件主要功能模块包括地表模块、钻孔模块、网格剖分模块、有限元计算模块、后处理显示模块及制图输出模块组成。

GWSS软件的地表和钻孔模块主要是用于构建地表模型和显示钻孔数据,并根据地表数据和钻孔数据采用断面法构建复杂地质模型。网格剖分模块主要是对复杂地质模型和结构模型进行有限元网格剖分,同时该模块还提供了处理排水孔、地下隧洞和管道、虹吸管、导渗盲沟等防渗排水结构的子结构单元的二次剖分功能。有限元计算模块主要包括基于排水子结构法的饱和-非饱和的稳定、非稳定的三维渗流有限元程序、管涌动态发展计算程序和三维渗固耦合计算程序等。后处理模块主要用于水头和压力、渗流梯度等数据的二维等值线图和三维等值面图的绘制。

2 渗流场分析

2.1 工程概况

积石峡水电站工程位于青海省循化县境内的黄河干流上,是黄河上游规划的第5个大型梯级电站。大坝为混凝土面板堆石坝,最大坝高103 m,总库容2.94亿 m^3 ,调节库容0.395亿 m^3 ,死库容1.93亿 m^3 。水电站装机容量1020 MW,多年平均发电量33.63 $\times 10^8$ kW \cdot h,保证出力332.3 MW。

枢纽主要建筑物由混凝土面板堆石坝、坝下掩埋式引水管道及坝后厂房、左岸岸边溢洪道、左岸中孔泄洪洞、左岸泄洪排沙底孔等组成。工程规模为II等大(二)型,大坝为I级建筑物。其平面布置及剖面位置

见图 2。

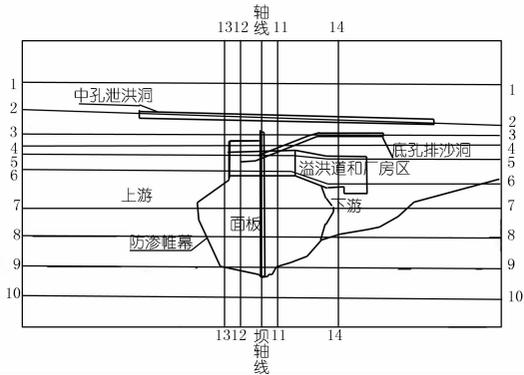


图 2 大坝平面布置及剖面位置

混凝土面板堆石坝坝顶高程为 1 861 m, 趾板开挖最低高程 1 758 m, 坝顶全长 322 m, 顶宽 10.0 m, 坝顶上游侧设置 5.2 m 高 L 形混凝土防浪墙, 上游坝坡 1:1.5, 下游坝坡 1:1.3~1.4。大坝典型横剖面见图 3。

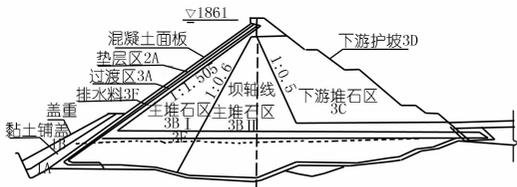


图 3 积石峡大坝标准横剖 (单位:m)

坝体材料分区主要由黏土铺盖区(1A)、盖重区(1B)、垫层区(2A)、特殊垫层区(2B)、过渡区(3A)、排水区(3F)、主堆石区(3B I 及 3B II)、下游堆石区(3C)、下游护坡(3D)组成。大坝主断面分区见图 3。2A 垫层区, 水平宽度 3 m, 位于面板下部, 采用砂砾石料筛分而成。2B 特殊垫层小区, 设置于周边缝下游侧, 采用砂砾石料筛分而成。3A 过渡区, 位于垫层区与主堆石区(排水区)之间, 水平宽度 3 m, 采用砂砾石料。

3B I 及 3B II 主堆石区是大坝的主料区和主要承载结构, 对坝体稳定和面板变形具有重要意义, 主要采用建筑物开挖料。主堆石 3B I 区的坝料主要采用以中细砂岩为主的洞挖料, 3B II 区的坝料采用枢纽区新鲜岩石开挖料。3C 下游堆石区, 位于坝轴线下游主堆石区后侧, 采用枢纽区建筑物弱风化开挖料。3F 排水区, 为 L 形坝体排水, 分为水平排水体和垂直排水体两部分。水平排水体位于高程 1 785~1 789 m, 垂直排水体位于过渡料下游侧、主堆石 3B I 料上游侧, 底部延伸至 1 785 m 高程, 顶部延伸至 1 857 m 高程, 采用人工砂砾石料。3D 块石护坡, 厚度 0.5 m, 采用粒径大于 300 mm 的卵石砌护。

2.2 计算模型及边界条件

积石峡水电站面板坝由于面板较薄、渗透系数较小、参数较多, 外加地下洞室的排水作用给渗流场精确模拟和求解收敛性带来较大挑战。本文对积石峡水电站大坝和坝基渗流计算模型进行了精细建模, 主要包括以下几部分。

(1) 坝体结构部分。包括面板、趾板、垫层区(2A)、特殊垫层区(2B)、过渡区(3A)、排水区(3F)、主堆石区(3B I 及 3B II)、下游堆石区(3C)、下游护坡(3D)。

(2) 坝址区地基部分。坝址区出露基岩主要为白垩系下统河口群, 根据岩层风化性质, 主要模拟了风化岩体($q > 3Lu$), 弱风化岩体($1Lu < q < 3Lu$) 和新鲜基岩($q < 1Lu$)。

(3) 地下隧洞部分。利用 8 节点六面体单元模拟地下隧洞, 其中六面体横截面周长等于洞室周长, 将地下隧洞简化为正方形, 对地下隧洞衬砌厚度进行精细模拟, 衬砌渗透系数取为混凝土渗透系数。

(4) 坝基防渗部分。帷幕灌浆、固结灌浆及洞室混凝土衬砌等。

根据设计单位提供的横剖面图、沿坝轴线纵剖面图、帷幕灌浆平面图和地质资料确定了积石峡水电站三维渗流场的计算范围如下: 计算区域的上游边界距坝轴线为 500.0 m, 左岸边界为中孔泄洪洞以左 150.0 m, 右边界为右坝肩以右至分水岭处, 下游边界为中孔泄洪洞出口下游 100.0 m, 底边边界高程为 1 500 m。坐标系的 X 轴为顺河向方向, Y 轴为沿坝轴线法向。在计算区域采用控制断面法对岩体的三维分布、防渗帷幕、坝体结构和地下洞室等结构进行了精细建模及三维有限元网格剖分, 共剖分 46 628 个单元, 48 701 个节点。

在进行正常蓄水工况分析时, 计算模型的边界条件如下: 库区低于蓄水位(1 856 m)的地方为库水边界, 水头值为 1 856 m, 高于蓄水位的地方为可能出渗边界; 在坝下游坡及河道内, 低于下游河水位(1 784 m)的地方为定水头边界, 水头值为 1 784 m。计算模型左右两侧垂直断面和上下游垂直河流断面边界为隔水边界。中孔泄洪洞和底孔排沙洞充水时按定水头边界处理, 不充水时按可能出溢边界处理。其余隧洞(如引水发电隧洞)壁面按不透水边界处理。

2.3 计算参数及上游水位

根据设计单位提供的坝体的材料参数以及防渗帷幕渗透系数, 类比其他工程的岩基渗透系数, 本文所采用各材料的渗透系数见表 1。

正常蓄水工况下,坝体上游水位为 1 856.0 m,下游河水水位为 1 784.0 m。

表 1 积石峡面板堆石坝各材料分区的渗透系数 cm/s

材料名称	渗透系数	材料名称	渗透系数
堆石	4.0×10^{-3}	防渗帷幕	1.0×10^{-5}
3BII 主堆石	6.0×10^{-3}	新鲜基岩	5.0×10^{-6}
3C 下游堆石区	1.0×10^{-3}	弱风化带	1.0×10^{-4}
3F 排水区	9.0×10^{-1}	强风化带	8.5×10^{-4}
垫层区 2A	1.2×10^{-3}	混凝土面板	1.0×10^{-7}
过渡区 3A	1.2×10^{-3}	混凝土衬砌	1.0×10^{-6}

2.4 计算结果分析

2.4.1 渗流场计算结果

图 4 给出了设计渗控方案下的整个计算域内渗流场自由面分布图,图 5 给出了设计渗控条件下面板下游侧垫层内地下水水位分布图,图 6~8 给出了不同剖面(主要是垂直坝轴线剖面)的渗流场分布(需要指出的是由于左岸坝体上游处有道山梁深入库区,图 7 剖面中形成的山体 and 坝体建筑物之间的空缺为库区)。由计算结果可看出,水库正常运行后,工程区的渗流场具有以下特点。

(1) 水库正常蓄水后,整个工程区地下渗流场分布合理。厂坝区的防渗系统(坝体面板 + 防渗帷幕)作用明显,面板和防渗帷幕下游侧的地下水水位均有较大跌落,面板后水位高程约 1 790~1 800 m(见图 4~5)。

(2) 坝体的面板发挥了非常好的防渗作用,面板几乎是不透水的,面板下游侧的坝体内的地下水水位较低,且地下水水位线几乎是平直的。

(3) 从图 5 可看出,河床部位面板下游侧的地下水水位基本上相同,为 1 791 m 左右,比上游库水低 58 m,仅比下游河床水位高出约 7.0 m;左岸坝头面板下游侧水位为 1 821.0 m,比上游库水低约 35 m;右岸坝头下游侧水位为 1 816.0 m,比上游库水低约 40.0 m。因此从坝区的渗流场分布形态来看,坝体面板及坝基帷幕的防渗效果是十分有效的。

(4) 由图 4~6 可看出,在左岸中孔泄洪洞周边,地下水等势线密集,且向洞内排水。在左岸山体的中孔泄洪洞位置高程较低,且混凝土衬砌的渗透系数稍小于岩体渗透系数,中孔泄洪洞仍然起到排水作用。因此左岸坝体上游处中孔泄洪洞上方的地下水水位降低,形成了明显的漏斗。

另外,底孔排水洞也起到一定的排水作用,特别是在坝体位置(见图 7),在底孔排沙洞周围,等水头线密集,水头消减明显。而在下游侧由于底孔排水洞高程

和地下水水位线接近,底孔排沙洞不再起排水作用(见图 4)。由图 4 和图 7 渗流场分布看,在底孔排沙洞和中孔泄洪洞联合排水作用下,在左岸山体形成局部漏斗,中孔泄洪洞附近等值线密集,且弯向上游,渗流场分布合理。

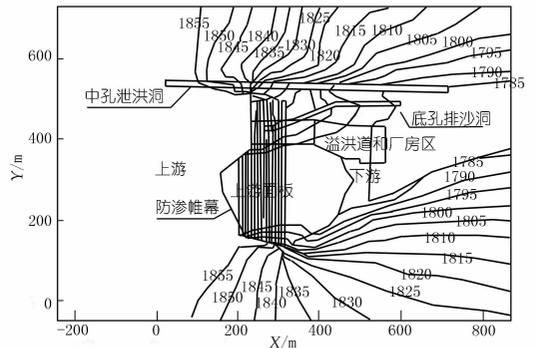


图 4 研究区地下水水位等值线(单位:m)

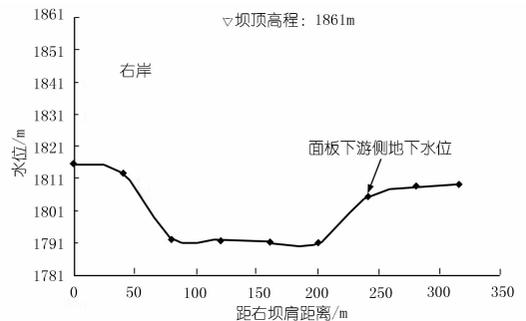


图 5 正常蓄水位下面板下游侧水位分布(位于下游侧垫层内)

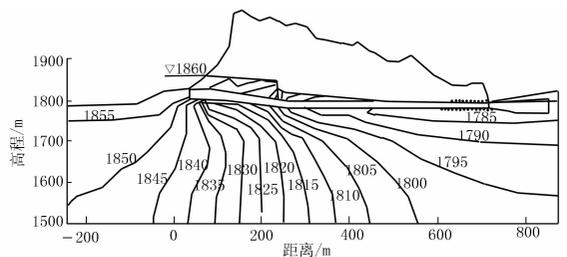


图 6 2-2 剖面水头等值线图(泄洪洞中心线剖面)(单位:m)

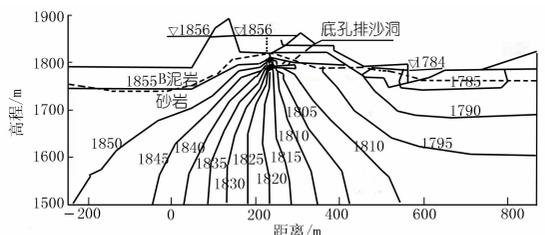


图 7 5-5 剖面水头等值线(单位:m)

2.4.2 各部位的渗透比降和渗流量

在对积石峡水电站厂坝区进行整体三维渗流场分析的基础上,又专门对坝体坝基各部位的渗流量进行了计算分析。

在设计渗控方案的稳定渗流条件下,通过坝体面板的渗流量计算值为 $64 \text{ m}^3/\text{d}$ 。通过坝基帷幕及其以下基岩的渗流量计算值为 $2\,428 \text{ m}^3/\text{d}$ 。通过右岸山体的绕坝流量为 $359 \text{ m}^3/\text{d}$,通过左岸山体的绕坝流量为 $159 \text{ m}^3/\text{d}$ 。积石峡水库通过坝体和坝基的总渗流量为 $3\,010 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

因厂坝区岩体和坝体面板的渗透系数比较小 ($< 10^{-5} \text{ cm/s}$),通过面板和坝基的渗流量较小,坝体面板及坝基帷幕的组合防渗效果较好。

2.4.3 关键部位渗透比降

工程关键部位的渗透比降大小也是水工渗流分析的重要内容之一。面板的最大渗透比降约 $130.0 \sim 160.0$,出现在桩号坝右 $0+134 \text{ m} \sim$ 坝右 $0+174 \text{ m}$ 的 $1\,780.0 \sim 1\,800.0 \text{ m}$ 高程之间。面板下游侧的垫层料和过渡料的渗透比降值均较小,分别为 0.178 和 0.16 左右。防渗帷幕的渗透比降最大值约为 $16.3 \sim 17.0$,出现在河床坝基部位,覆盖层最大渗透比降较小,最大值小于 0.1 。上述计算得到的各关键部位的最大渗透比降均小于设计允许比降。

3 结语

利用编制的三维可视化有限元分析软件,对积石峡面板堆石坝复杂渗流场进行了数值模拟分析,研究了面板和防渗帷幕组合防渗、中孔泄洪洞和底孔排沙

洞排水条件下的工程区渗流场分布特征。计算结果表明,面板和防渗帷幕的组合防渗体系起到了很好的防渗效果,能够保证大坝的安全运行。

参考文献:

- [1] 杨得勇,雍莉. 混凝土面板砂砾石坝垫层料过渡料渗流及渗透稳定性试验研究[J]. 西北水电,2001,(2):47-50.
- [2] 钮新强. 清江水布垭面板坝渗流控制技术创新与实践[J]. 人民长江,2011,42(5):1-4.
- [3] 吴静茹. 混凝土面板砂砾石坝二维渗流有限元实例分析[J]. 人民长江,2010,41(12):28-30.
- [4] 朱岳明,龚道勇,章洪,等. 碾压混凝土坝渗流场分析的缝面渗流平面单元模拟法[J]. 水利学报,2003,(3):63-68.
- [5] 王瑞骏,吕海东,李炎隆,等. 堆石坝混凝土面板裂缝的渗流形态及计算模型[J]. 水资源与水工程学报,2008,(1):19-22.
- [6] 张嘎,张建民,洪楠,等. 面板堆石坝出现裂缝工况下的渗流分析[J]. 水利学报,2005,36(4):420-425.
- [7] 赵君. 面板堆石坝集中渗流研究[J]. 大连理工大学学报,1999,39(3):460-463.
- [8] 江春波,杜惠惠. 非均匀介质的三维渗流有限元模型[J]. 清华大学学报,1999,39(11):21-24.
- [9] 张嘎,张建民,江春波,等. 溪洛渡水电站上游围堰渗流分析及防渗型式比较[J]. 水力发电学报,2002,41(1):54-61.
- [10] 宋永杰. 公伯峡面板堆石坝设计与施工特点[J]. 水力发电,2002,(8):38-40.
- [11] 刘昌军,丁留谦,孙东亚,等. 溪古水电站左岸三维渗流场有限元分析[J]. 长江科学院院报,2009,(增):54-57.
- [12] 马驰. SIP 和 PCG2 两种迭代法在地下水数值计算中的应用对比[J]. 西安科技学院学报,2002,22(1):59-62.
- [13] 刘昌军. 虹吸井子结构法在尾矿坝复杂渗流场求解中应用[J]. 水利水电科技进展,2011,(3):81-85.
- [14] 宋飞,张嘎,张建民,等. 各向异性对积石峡面板堆石坝渗流的影响分析[J]. 岩土力学,2007,28(增):286-290.

(编辑:郑毅)

Finite element fine simulation of complicated seepage field of concrete face rockfill dam of Jishixia

LIU Changjun¹, DING Liuqian¹, XU Zeping¹, CAI Xinhe², ZHANG Shunfu¹

(1. Department of Water Hazard Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
2. Hydrochina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: Using the visualization finite element analysis software "Ground Water Simulation System" (GWSS), we conduct precise modeling of Jishixia concrete face rockfill dam. It covers the modeling of dam body (concrete face, transition layer, drainage layer, rockfill materials), dam foundation, anti-seepage curtain, spillway tunnel and bottom desilting tunnel. Numerical simulation of the complicated seepage field is performed by improved cut off negative pressure method with free surface evolution, tunnel substructure and Preconditioned Conjugate Gradient algorithm for solving large sparse matrix. Seepage distribution characteristics and seepage control effect for the combination of concrete face and anti-seepage curtain as well as the influence of spillway tunnel and bottom desilting tunnel on the seepage flow in the dam are studied. Numerical simulation results show that, the combination of concrete face and anti-seepage curtain does well in seepage control under normal operation condition. Meanwhile, the bottom desilting tunnel and spillway tunnel on the left bank play a positive role. They reduce the groundwater level of left bank significantly and are favorable to the stability of the dam and bank slope.

Key words: fine simulation; complicated seepage field; underground cavern; anti-seepage effect; concrete face rockfill dam