

面板裂缝对积石峡水电站大坝渗流场影响的数值模拟

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, 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 基于面板等宽缝隙稳定流的运动规律, 采用裂缝面单元法建立了混凝土面板裂缝的渗流计算模型, 实现了渗流全场和裂缝渗流分析的统一。在此基础上编制了含裂缝面单元的三维渗流场有限元计算软件 GWSS, 利用该软件对积石峡水电站大坝正常运行和发生竖向裂缝的工况进行渗流场分析, 获得了大坝面板产生裂缝后的渗流场分布规律。计算结果表明, 不同位置、长度和宽度的面板裂缝对大坝渗流场、渗流量和渗透比降影响不同, 上部裂缝对大坝渗流场的影响较小, 下部和中部裂缝的影响较大。一旦面板发生裂缝, 面板附近、垫层和过渡区出现较大渗透比降, 且随着与裂缝距离的增大而快速衰减。

关键词 混凝土面板; 裂缝; 渗流; 数值模拟; 有限元分析; 积石峡水电站

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2011)06-0050-05

Numerical simulation of influences of cracks on seepage fields of Jishixia Hydropower Station // LIU Chang-jun¹, DING Liu-qian¹, XU Ze-ping¹, CAI Xin-he², ZHANG Shun-fu¹ (1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. HydroChina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the motion law of the steady flows in aequilate cracks, a numerical model for the cracks in concrete face rockfill dams was established by use of the interface element method. The unification of the seepage analysis in cracks and other sections was achieved. Accordingly, a finite element analysis software—ground water simulation system (GWSS) for 3D seepage fields of concrete face rockfill dams with crack elements was compiled. By means of the GWSS, the seepage fields of Jishixia Concrete Face Rockfill Dam under two working conditions without cracks and with vertical cracks were analyzed. The distribution laws of the seepage fields were obtained after the occurrence of cracks in the face. The numerical results show that the cracks at different locations with different depths and widths have different influences on the seepage fields of the dam, seepage discharge and permeability gradient. The cracks appeared at the upper part of the dam exert less influences on the seepage fields than those at the lower and middle parts. Once cracks appear in the face, large permeability gradient will be aroused in the surrounding areas of the face and transition materials in the cushion layer and it rapidly decays with the increase of the distance from the cracks.

Key words: concrete face rockfill dam; crack; seepage flow; numerical simulation; finite element analysis; Jishixia Hydropower Station

近年来面板堆石坝防渗结构的渗流特性和渗透稳定性备受关注, 如果作为防渗结构的面板出现裂缝, 其对坝体渗流场及坝体稳定影响较大^[1-3]。目前已发展了多种关于面板裂缝的渗流计算模型或计算方法。采用有限元分析面板裂缝的渗流场时, 主要有以下几种处理方法: 一是简化边界条件, 该方法不能反映裂缝的尺寸效应; 二是将裂缝概化为薄层单元, 该方法难以适用裂缝较多的情况; 三是将裂缝与周围的介质概化为各向异性介质进行渗流分析, 该方法只适用于裂缝较多的情况, 且难以获得裂缝附近的渗流场; 四是根据水流通过裂缝的运动规律进

行推导, 称之为裂缝渗流法。该方法假定裂缝渗流为层流且裂缝宽度不变, 然后在立方定理中引入缝面粗糙度进行修正, 获得通过单位长度裂缝的渗流量以及面板全部裂缝的总渗流量估算公式。在上述4种处理方法的基础上, 一些学者又进行了改进, 先后提出有限元边界元耦合分析方法^[4]、特殊单元法^[5]、等效隙宽—宏观各向异性体模型^[6]、不等宽裂缝渗流法^[7]、基于固定网格的全场有限元分析法等^[8-9]。

上述众多方法或多或少都存在一定的缺陷, 有的方法假定的面板裂缝宽度较大, 有的方法缺乏定

量指标, 还有的方法不能精确模拟裂缝处的渗流场分布。鉴于此, 笔者提出了采用裂缝面单元方法将裂缝处的渗流场统一到全场渗流场中的整体求解方法。该方法不需要对裂缝单元进行划分, 弥补了奇异单元带来的求解不收敛问题, 另外可以求解面板裂缝数量较多时的大坝渗流场。该方法既可以得到裂缝处的精细渗流场, 又可以得到整个计算区域的渗流场, 且计算量小、稳定性好、计算精度高。最后以积石峡水电站为例, 采用该方法研究了面板竖向裂缝失效后的渗流场分布。通过假定面板竖向裂缝的不同开裂位置、长度和宽度, 研究裂缝几何尺寸和所在位置对渗流场分布规律、水力比降以及渗流量的影响。

1 面板裂缝的计算模型及软件编制

1.1 裂缝面单元控制方程的建立

首先考察以下单向裂缝面渗流问题, 如图 1 所示(图中坐标为局部坐标, 1, 2, 3, 4 为单元结点编号)。设界面沿水流方向的长度为 L , 界面宽度为 B , 在沿程 L 内的水头差为 ΔH 。假设通过该裂缝面的总流量为 Q , 由此可得裂缝面在界面宽度范围内的单宽渗流量为

$$q = \frac{Q}{B} \tag{1}$$

水力梯度为

$$J = \frac{\Delta H}{L} \tag{2}$$

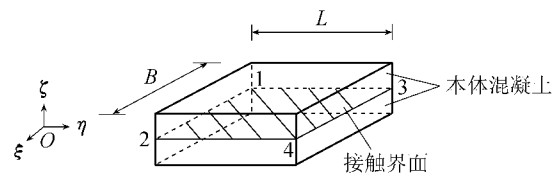


图 1 裂缝面单元示意图

由于裂缝面单元没有厚度, 其界面上渗透率不具有一般渗透系数的意义。这里裂缝面的渗透率定义为单位水力梯度作用下单位界面宽度范围内的渗流量, 以 k' 表示, 量纲为 L^2T^{-1} , 即

$$k' = \frac{q}{J} \tag{3}$$

对于实际存在的裂缝, 当缝隙宽度为 b 时, 根据裂隙渗流理论有

$$k' = \frac{gb^3}{12\nu} \tag{4}$$

式中: g 为重力加速度; ν 为水流运动黏滞系数, 在水温为 $15^\circ C$ 时 $\nu = 1.14 \times 10^{-6} m^2/s$ 。

将式(3)写成微分形式, 便得到裂缝面渗流的广义达西定律:

$$q = k'J = -k' \frac{dH}{dx} \tag{5}$$

将式(5)推广得

$$\begin{cases} q_x = -k'_x \frac{\partial H}{\partial x} \\ q_y = -k'_y \frac{\partial H}{\partial y} \end{cases} \tag{6}$$

式中: k'_x, k'_y 分别为 x, y 方向的单位界面宽度范围内的渗透系数。

此时, 裂缝渗流连续性方程为

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \tag{7}$$

将渗流运动方程(式(6))代入连续性方程(式(7))得

$$k'_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k'_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \tag{8}$$

式(8)即为裂缝面单元的控制方程。

1.2 含裂缝面单元的有限元方程

裂缝面单元体如图 1 所示。令

$$H = \sum_{i=1}^4 N_i H_i \tag{9}$$

式中: H 为单元内任一点水头值; N_i 为单元插值形函数; H_i 为单元结点水头值。

根据变分原理, 由式(8)和式(9)易得单元系数矩阵元素为

$$k'_{ij} = \iint_{\Omega_e} \left(k'_x \frac{\partial N'_i}{\partial x} \frac{\partial N'_j}{\partial x} + k'_y \frac{\partial N'_i}{\partial y} \frac{\partial N'_j}{\partial y} \right) dx dy \quad (i, j = 1, 2, 3, 4) \tag{10}$$

式中: N'_i, N'_j 分别为 i, j 结点的裂缝面单元插值形函数; Ω_e 为裂缝界面单元积分区域。

对于任意倾斜角度、任意形状的空间界面单元, 只需进行坐标变换即可形成整体渗透矩阵。

对于常规的非裂缝单元, 满足多孔介质的达西定律, 其控制微分方程为

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} = 0 \tag{11}$$

单元渗透系数矩阵元素为

$$k_{ij} = \iiint_{V_e} \left(k_x \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + k_y \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} + k_z \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) dx dy dz \quad (i, j = 1, 2, \dots, 8) \tag{12}$$

式中: N_i, N_j 分别为 i, j 结点的六面体单元插值形函数; V_e 为六面体单元积分区域。

两种类型单元按照对应结点进行叠加, 可得到整体渗透系数矩阵, 由此可得含界面单元的面板堆石坝有限元方程如下:

$$KH = F \tag{13}$$

式中: K 为整体渗透矩阵; H 为未知结点水头列阵; F 为等效结点流量列阵。

求解式(13),即得整个计算区域的渗流场水头分布。

1.3 软件编制

根据上述计算原理,采用IDL语言编制完成了三维渗流场有限元计算软件GWSS。该软件主要包括地表模块、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。各模块的功能见文献[10-14]。针对面板裂缝渗流问题,该软件提供了含裂缝单元渗流场的分析功能。

2 工程应用

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。最大坝高为103 m,总库容为 $2.94 \times 10^8 \text{ m}^3$,调节库容为 $0.395 \times 10^8 \text{ m}^3$,死库容为 $1.93 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。水电站装机容量为1020 MW,多年平均发电量为 $33.6 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

枢纽建筑物主要由混凝土面板堆石坝、坝下掩埋式引水管道、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。工程规模为二等大(2)型,大坝为1级建筑物。

混凝土面板堆石坝坝顶高程为1861 m,趾板开挖最低高程为1758 m,最大坝高为103 m,坝顶全长322 m,坝顶宽10 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1:1.3~1:1.4。大坝沿坝轴线典型纵剖面见图2。

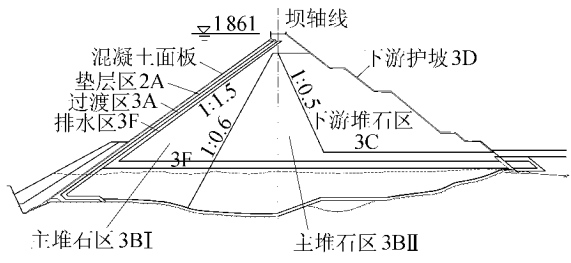


图2 积石峡水电站大坝典型纵剖面

2.1 计算模型

积石峡水电站大坝由于面板较薄,渗透系数较小,参数较多以及地下洞室的排水作用给渗流场的精确模拟和求解的收敛带来较大难度。本文计算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(3BI及3BII)、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、弱风化岩体和新鲜基岩。③地下隧洞部分:主要用子结构方法进行模拟,利用八结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,假设衬砌渗透系数等于混凝土渗透系数。④坝基防渗部分:包括帷幕灌浆、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500 m,左岸边界为中孔泄洪洞以左150 m,右岸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 m,底边边界高程为1500 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坝基、防渗帷幕、坝体结构和地下洞室等进行了精细建模及三维有限元网格剖分(图3),共剖分了46628个单元,48701个结点。在裂缝处布置控制剖面,裂缝长度采用结点进行控制。

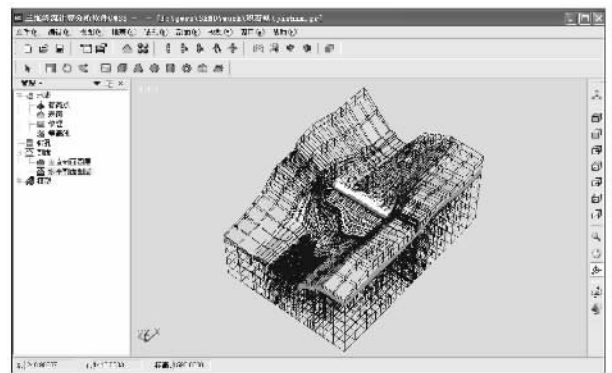


图3 积石峡水电站计算区域三维有限元网格剖分

2.2 裂缝位置

由于面板出现裂缝的位置和尺寸较难确定,偏于安全考虑,结合大坝特点对可能发生的裂缝进行假定:①竖向裂缝长度分别为1 m和5 m;②上、中、下3条缝分别位于坝高90 m、48 m和5 m处;③假定裂缝的宽度分别为1 mm、10 mm、30 mm和100 mm。

在本实例中,重点研究在面板接缝止水失效的非常情况下坝体渗流场的变化规律。根据设计方案,各工况的上游水位取正常蓄水位1856 m,下游河水位取1784 m。

2.3 计算参数

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

2.4 正常工况计算分析

图4给出了正常工况计算区域的地下水位等值

表 1 积石峡面板堆石坝各材料分区的渗透系数

材料分区	主堆石区 3B I	主堆石区 3B II	下游堆石区 3C	排水区 3F	垫层区	过渡区	防渗帷幕	新鲜基岩	弱风化带	强风化带
渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	4×10^{-3}	6×10^{-3}	1×10^{-3}	9×10^{-1}	1.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	1×10^{-5}	5×10^{-6}	1×10^{-4}	8.5×10^{-4}

线,图 5 给出了大坝最大横断面渗流场分布。由图 4 和图 5 可知,等水头线主要集中在大坝上游侧防渗帷幕和基岩部位。主要原因是上游防渗帷幕和基岩的渗透系数相对较小。由于排水体的强排水性,坝体内浸润线处于排水体内,次堆石区位于浸润线以上,坝体内的水力坡降较小,等水头线较为稀疏。计算结果表明,该坝坝体和坝基防渗设计是合理的,不会发生渗流和渗透破坏。

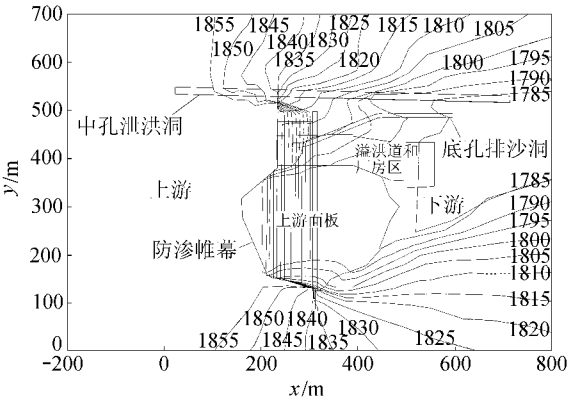


图 4 研究区地下水位等值线(单位:m)

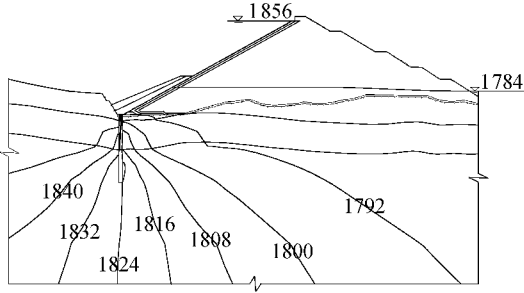
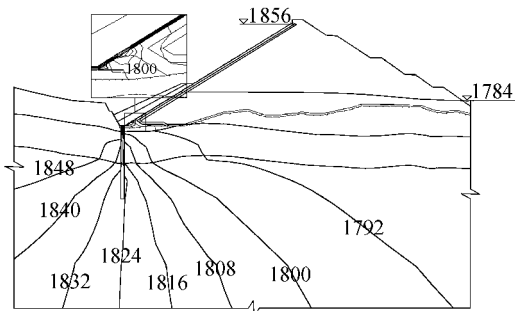


图 5 大坝最大横断面渗流场分布(单位:m)

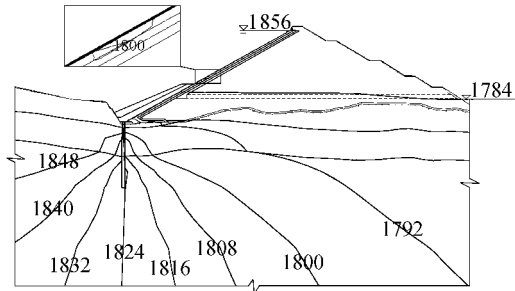
2.5 裂缝对渗流场的影响分析

为研究防渗体结构出现裂缝的非常工况下大坝渗流场特性以及裂缝位置、宽度和长度对渗流场的影响,共计算了 3 种工况组合下的渗流分布。受篇幅长度所限,只给出面板出现不同位置高程处裂缝(分别为上、中、下缝)后的渗流场分布(缝宽 1 mm、缝长 1 m)。图 6 给出了面板出现裂缝(缝宽 1 mm、缝长 1 m)后大坝最大横断面上的渗流场分布。图 7 和图 8 分别给出了坝后水位的升高值和面板裂缝处的渗流量随缝宽的变化(缝长 1 m)。

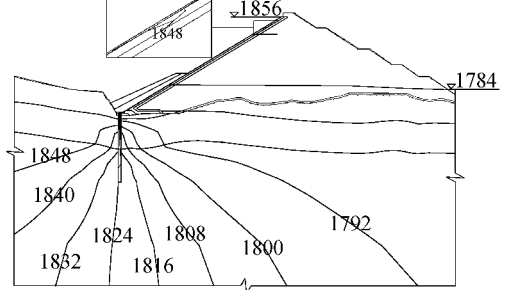
由图 6 可以看出,裂缝出现在坝顶附近时对浸润线和水头分布影响较小,主要原因是渗透水流通过裂缝后在反滤层内向下方渗透,并通过堆石体流向下游,难以造成浸润线的抬高。当裂缝出现在坝



(a) 下缝开裂



(b) 中缝开裂



(c) 上缝开裂

图 6 面板出现裂缝后大坝最大横断面上的渗流场分布(单位:m)

底部和中部时,渗流量较大,浸润线较高,主要原因是该裂缝处的水压力相对较大而且靠近排水体。由计算结果可知,裂缝的位置不同对大坝的渗流量和渗流场的影响程度也不同。

由图 7 可知,面板分别出现上、中、下缝(缝长 1 m、缝宽 1 mm)时,坝后水位分别抬高 0.34 m、2.29 m 和 3.04 m;同时出现上、中、下 3 条缝时,坝后水位抬高 3.41 m,坝体和坝基内渗流场总体变化不大。随着缝宽的增加,坝体内水位逐渐增高,当中缝宽度达到 100 mm 时,坝体地下水位升高了 14.7 m(裂缝处局部)对坝体内渗流场有一定的影响。根据图 8 的计算结果,当面板出现不同位置裂缝时,裂缝处渗流量随缝宽的增大而增大。

由计算结果可知,水库正常运行时垫层和过渡区的最大渗透比降分别为 0.18 和 0.16,而面板下缝

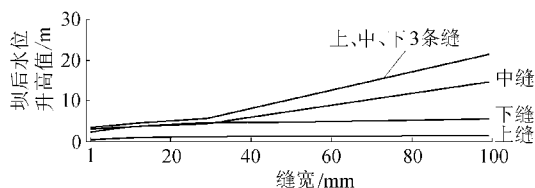


图7 坝后水位升高值随缝宽的变化(缝长1 m)

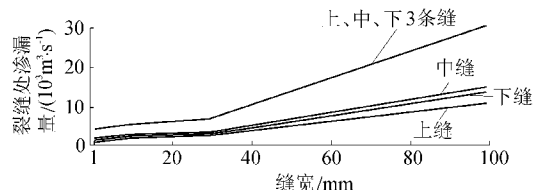


图8 面板裂缝处的渗流量随缝宽的变化(缝长1 m)

开裂后(缝长1 m、缝宽1 mm)垫层内渗透比降为2.89,过渡区内渗透比降为1.45,和其他位置出现裂缝的计算结果较为接近。因此,一旦发生裂缝,垫层和过渡区的渗透坡降明显增大,主要原因是垫层和过渡区的渗透系数比其后面坝体材料的渗透系数小得多,水头损失较大,且裂缝周围的渗透比降随着与裂缝距离的增大急剧减小,见图(a)。

总之,在面板竖向缝止水失效、面板产生大量裂缝的极端情况下,面板的防渗性能大幅度降低,坝体渗流状况急剧恶化。在此情况下,除面板、主次堆石区、坝基和防渗帷幕处的渗透坡降有所减小外,垫层和过渡区的渗透坡降明显增大。垫层及过渡区的渗透稳定性应特别予以关注。

3 结 语

采用裂缝面单元法和固定网格的有限元理论进行含裂缝面单元的面板堆石坝的全场渗流分析。针对积石峡水电站大坝面板发生局部裂缝的极端工况进行三维稳定渗流分析。从积石峡水电站大坝面板发生裂缝的渗流场计算结果可得出以下结论:①在正常设计工况及水位条件下,面板和坝基防渗系统起到了很好的防渗作用,大坝渗流量不大,垫层和过渡区渗透比降较小,坝体具有较高的渗透稳定性。②裂缝位置不同对大坝渗流场和渗流量的影响程度也不同。裂缝发生在坝顶附近时,对大坝渗流场的影响较小,而当裂缝出现在大坝底部和中部时,大坝的渗流量较大,浸润线较高,特别是裂缝宽度较大、长度较长时,将影响坝体的稳定。③一旦面板发生裂缝,面板后的垫层和过渡区渗透比降急剧增大,垫层及过渡区的渗透稳定性应特别予以关注。

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] 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.
[3] 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.
[4] 张有天, 陈平, 王镭. 有排水孔的三维渗流场的有限元-边界元耦合分析[J]. 水利学报, 1985, 16(5): 30-38.
[5] 许国安, 杨凯宏, 武桂生. 小浪底水库坝基防渗墙裂缝对渗流控制的影响[J]. 人民黄河, 1993(9): 28-31.
[6] 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, 34(3): 63-68.
[7] 王瑞骏, 吕海东, 李炎隆. 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.
[8] 张嘎, 张建民, 洪锦. 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.
[9] 宋飞, 张嘎, 张建民. 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(5): 286-290.
[10] 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(5): 54-57.
[11] 刘昌军, 丁留谦, 杨凯虹, 等. 水位骤降条件下有密集排水孔大坝三维渗流场数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2011(3): 24-30.
[12] 周朋, 刘昌军, 池为, 等. 万家口子水电站拱坝坝基渗流场有限元数值模拟分析[J]. 中国西部科技, 2009(3): 12-16.
[13] 刘昌军, 丁留谦, 高立东, 等. 文登市抽水蓄能电站三维渗流场有限元分析[J]. 水电能源科学, 2011(7): 57-60.
[14] 刘昌军. 虹吸井子结构法在尾矿坝复杂渗流场求解中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(3): 65-69.

(收稿日期 2010-06-22 编辑 骆超)

(上接第30页)

[2] 孙启冀, 侍克斌, 李捷. 碾压混凝土坝底孔缺口坝段三维有限元应力分析[J]. 吉林水电, 2006(2): 29-30.
[3] 吕岳鹏. 混凝土大坝中施工导流底孔与缺口的优化布置[J]. 武汉水利电力学院学报, 1990, 23(6): 97-99.
[4] 王才欢, 杨文俊, 周赤, 等. 三峡工程导流底孔水力学研究与运用[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 65-70.
[5] 潘家铮. 世界上无没有裂缝的水坝[J]. 中国三峡建设, 2002(4): 6-8.
[6] 汪安华, 许志安. 防止三峡大坝上游坝面产生垂直裂缝的研究[J]. 人民长江, 1994, 25(9): 7-13.
[7] 阮征, 李林松, 张绘. 混凝土坝上游坝面裂缝处理[J]. 湖北水力发电, 2004(1): 29-30.
[8] 许正平, 李浚元. 三峡二期工程大坝上游面裂缝处理[J]. 西北水电, 2005(2): 33-36.
[9] 王盟, 凌春海, 陈共建. 红河南沙水电站底孔孔口效应分析与结构设计[J]. 人民珠江, 2010(3): 25-31.
[10] 屈高见, 王健, 马东辉. 龙口水电站大坝横缝渗漏处理工程的施工工艺[J]. 水利与特殊构筑物防水, 2010(13): 14-16.

(收稿日期 2011-05-23 编辑 骆超)