

莆田西音胶凝砂砾石坝三维渗流有限元分析

夏厚兴¹

(福建省水利水电勘测设计研究院 福建 福州 350001)

摘要: 针对西音胶凝砂砾石坝工程设计防渗方案, 基于 FEFLOW 地下水模拟软件, 建立对坝体和坝基进行精细分层分区的非溢流坝段三维渗流有限元模型, 并进行稳定渗流场数值模拟研究, 通过计算分析渗流等水头线、渗透压力、浸润线和渗流量等, 验证了坝体和坝基防渗和排水措施的合理性及其效果, 可为工程施工设计提供参考。

关键词: 胶凝砂砾石坝; 三维渗流; 有限元; FEFLOW; 防渗排水

中图分类号: TV6

文献标识码: A

0 前言

胶凝砂砾石坝起步晚, 我国采用胶凝砂砾石筑坝技术始于 2004 年福建街面水电站下游量水堰和洪口水电站上游围堰^[1]。作为一种筑坝新技术, 其用于永久工程的案例尚不多, 有关胶凝砂砾石坝渗流研究也较少。刘文拯等利用二维有限元模型, 分析了 Hardfill 坝坝基不同渗透系数取值条件下的渗流场规律, 并探讨了坝上游不同铺盖长度对渗流场的影响^[2]。张凤德等对胶凝砂砾石坝钢筋砼面板防渗措施及高强度胶凝砂砾石面板和面板下铺设复核土工膜两种防渗措施进行分析, 认为钢筋砼面板防渗效果较好, 高强度胶凝砂砾石面板防渗效果较差^[3]。寇自洋以大同市阳高县守口堡水库大坝为例, 基于 ADINA 建立有限元模型对守口堡胶凝砂砾石坝渗流场进行模拟, 提出在大坝坝踵处应增设防渗设施, 坝趾处应增加排水措施^[4]。本文针对莆田西音水库胶凝砂砾石坝非溢流坝段稳定渗流问题, 建立三维有限元渗流模型, 验证设计渗控措施合理性及其效果, 为工程设计提供参考。

1 工程概况

西音水库工程位于莆田涵江区、荻芦溪干流上游, 为中型水库, 总库容 2755 万 m³, 工程等别为 III 等, 主要建筑物胶凝砂砾石坝级别为 3 级。大坝坝长 395m, 坝顶宽 6m, 坝顶高程 193.10m, 最大坝高 52m, 采用非对称剖面型式, 坝体上游面坡率 1:0.4, 下游

¹ 作者简介: 夏厚兴 (1989-), 男, 湖北麻城人, 工程师, 主要从事水动力研究工作。

面坡率 1:0.7。坝体迎水坡采用 C₁₈₀20W6 富浆胶凝砂砾石作为防渗体，防渗体水平长度 2.5m，坝体内部采用 C₁₈₀6 胶凝砂砾石填筑，坝体下游面设 C₁₈₀20W4 富浆胶凝砂砾石保护层，保护层水平长度 1.5m，大坝基础设三级配常态混凝土垫层，厚 0.8m。河床段坝基利用弱风化上部岩体作为建基面，大部分区域为弱~微透水岩体，相对隔水层（ $q \leq 5Lu$ ）顶板线埋深 13.3~27.1m。坝体内设灌浆排水廊道，坝基帷幕灌浆深度 15~48m，深入相对隔水层顶板线以下 3~5m，坝基主排水孔孔深 10~22m，孔距 3m。

2 计算原理和方法

2.1 计算原理

目前，研究渗流运动的基本方程都是基于渗流达西定律和水流连续性方程建立起来的^[5,6]。根据渗流达西定律，在非均质各向异性孔隙介质中，地形水流动满足：

$$\begin{cases} v_x = k_x \frac{\partial H}{\partial x} \\ v_y = k_y \frac{\partial H}{\partial y} \\ v_z = k_z \frac{\partial H}{\partial z} \end{cases} \quad (2-1)$$

代入可压缩介质渗流连续性方程：

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = \rho g(\alpha + n\beta) \frac{\partial H}{\partial t} \quad (2-2)$$

令 $\mu_s = \rho g(\alpha + n\beta)$ (μ_s 为单位储水量或储存率)，并考虑渗流源汇项，即可得考虑土体压缩性的非均质各向异性多孔介质三维渗流方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = \mu_s \frac{\partial H}{\partial t} + Q \quad (2-3)$$

当不考虑土体的压缩性或者单位储存率时，即可得出非均质各向异性多孔介质三维稳定渗流模型控制方程：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = Q \quad (2-4)$$

初始条件：

$$H(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = H_0(x, y, z) \quad (x, y, z) \in D \quad (2-5)$$

水头边界条件（第一类边界）：

$$H \Big|_{B_1} = H_1(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in B_1 \quad (2-6)$$

流量边界条件（第二类边界）：

$$K \frac{\partial H}{\partial n} \Big|_{B_2} = q(x, y, z, t) \quad (x, y, z) \in B_2 \quad (2-7)$$

以上各式中： k_x ， k_y ， k_z 分别为沿坐标轴方向的渗透系数， v_x ， v_y ， v_z 分别为沿坐标轴方向的渗流流速， ρ 为水的密度， g 为重力加速度， α 为多孔介质压缩系数， β 为水流压缩系数， n 为孔隙度， Q 为源汇项， H_0 初始地下水位， D 为渗流区域， H_1 为已知水头， B_1 、 B_2 分别为第一、第二类边界， \vec{n} 为 B_2 外法线方向， $q(x,y,z,t)$ 为边界已知流量。

2.2 计算方法

目前，计算稳定渗流场的数值模拟方法包括有限差分法、有限元法、边界元法和无单元法等，其中有限差分法和有限元法应用较为广泛，20世纪80年代美国地质调查局开发的MODFLOW软件和20世纪70年代德国开发的FEFLOW软件分别为采用这两种不同数值模拟计算方法的典型代表^[5,6,7,8]。

3 数值模拟方案

3.1 计算软件

本文三维渗流模拟采用基于有限元法的FEFLOW 6.0软件。FEFLOW是由德国水资源规划与系统研究所(WASY)开发出来的地下水流运动及物质迁移模拟软件系统，是迄今为止功能最为齐全的地下水模拟软件之一^[7]。该软件功能强大、应用广泛，可用于水库大坝二维和三维稳定渗流和非稳定渗流有限元数值模拟分析。

3.2 模型构建

3.2.1 模型范围和网格剖分

针对西音胶凝砂砾石坝非溢流坝段三维稳定渗流问题，建立坝左0+083m至坝右0+035m坝段（长度118m，约占大坝总长度的30%）三维稳定渗流模型。模型上游模拟至坝轴线上游120m库区，模型下游模拟至距离坝轴线约150m区域，模型底部模拟至不透水层。

模型采用断面纵向投影生成网格然后横向扩展成3D模型，平行坝轴线方向自左至右共划分了140层，排水孔所在位置层厚0.1m。模型采用三角形网格单元，对坝基排水孔附近网格进行加密处理，最小网格尺度0.1m，与排水孔孔径大小相当，能较真实的反映排水孔实际情况。模型节点数1012597个，网格数2091680个。模型三维视图如图1，断面网格划分见图2。

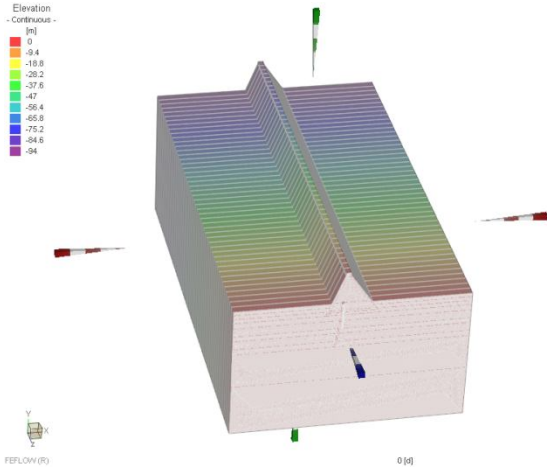


图 1 模型三维视图

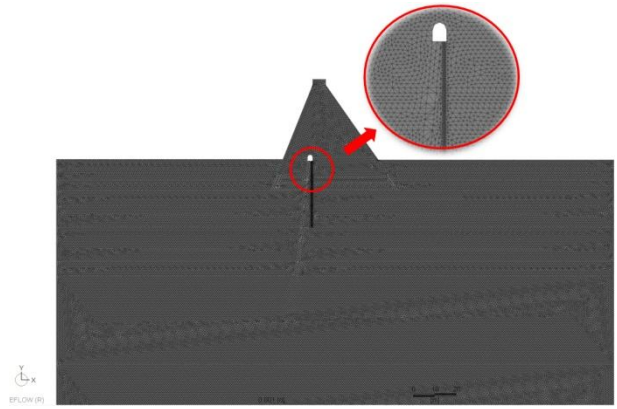
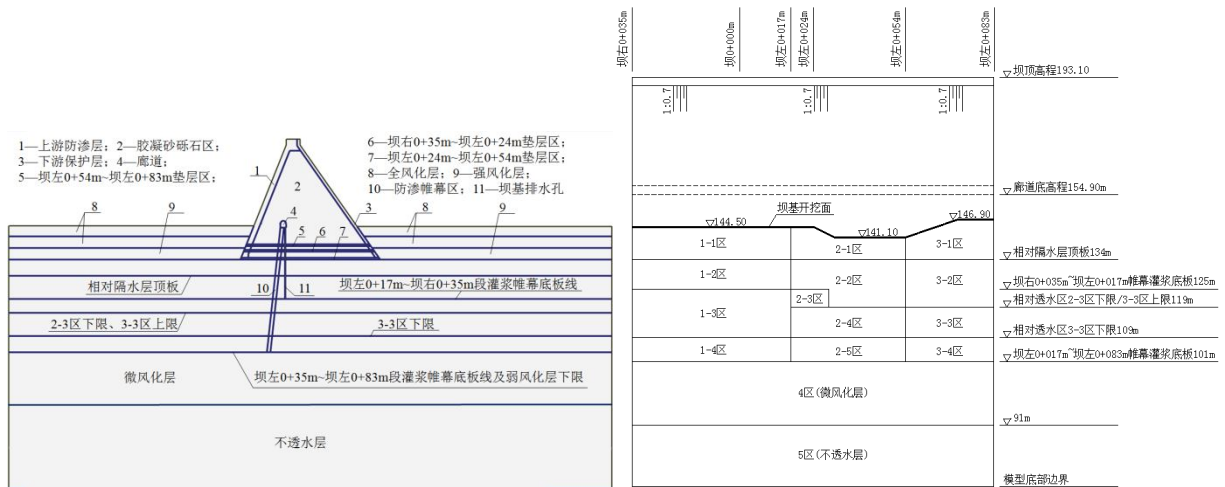


图 2 模型断面网格剖分

3.2.2 坝体和坝基分区

模型坝体按 3 种不同断面进行简化模拟，其中坝右 0+035m~坝左 0+024m 采用坝左 0+012m 非溢流断面（建基面高程 144.5m），坝左 0+024m~坝左 0+054m 采用坝左 0+052m 断面（建基面高程 141.1m），坝左 0+054m~坝左 0+083m 采用坝左 0+072m 断面（建基面高程 146.9m）。坝体根据筑坝材料的不同分为上游防渗区（富浆胶凝砂砾石 C18020W6）、C1806 胶凝砂砾石填筑区、下游保护区（富浆胶凝砂砾石 C18020W4F50）、廊道区、三级配常态砼垫层区（C2820W6F50）、三级配常态砼垫层区（C2815W4F50）。

坝基根据灌浆帷幕、排水孔幕、相对隔水层顶板（ $q \leq 5Lu$ ）、帷幕灌浆底板线、弱风化层下限、未风化层以及地质钻孔所显示的透水性差异共分为 14 区。模型坝体和坝基分区见图 3。



(3a) 模型横剖面

(3b) 模型纵剖面

图 3 模型坝体和坝基分层分区示意

3.2.3 坝基排水孔模拟

有关排水孔在渗流有限元中的模拟一直是渗流模拟的一大难题，许多学者曾对此作了大量研究，模拟方法包括：杂交元法^[9]、以沟代并列法^[10]、等效杆单元法^[11]、排水孔子结构法^[12]、以管代孔法^[13]、以缝代并列法^[14]等。胡静等提出将排水孔视作为一特殊介质，赋予一定的渗透系数，并按照实体单元进行计算，并将这种方法命名为“空气单元法”，并通过研究得出，排水孔渗透性大于周边介质渗透性的 1000 倍时，可将误差控制在工程许可的范围内^[15]。本文采用空气单元法进行坝基排水孔模拟，模型排水孔深 10~22m，孔距 3m，孔径 0.1m，设置排水孔网格单位渗透系数不小于排水孔周边介质的 1000 倍。

3.3 参数选取

坝体和坝基各分区渗透系数根据工程地质勘探和岩土及材料试验成果确定，取值分别见表 1、表 2。

表 1 坝体各分区渗透系数

区域	渗透系数 (cm/s)	
	水平方向	垂直方向
上游防渗层 (富浆胶凝砂砾石 C ₁₈₀ 20W6F50)	5.75×10^{-9}	4.15×10^{-9}
下游保护层 (富浆胶凝砂砾石 C ₁₈₀ 20W4F50)	7.40×10^{-9}	5.80×10^{-9}
坝体胶凝砂砾石 C ₁₈₀ 6	7.20×10^{-7}	2.10×10^{-7}
垫层 (三级配常态砼)	7.25×10^{-9}	6.95×10^{-9}

表 2 坝基各分区渗透系数

区域划分	综合渗透系数 (cm/s)	区域划分	综合渗透系数 (cm/s)
1-1 区	1.77×10^{-3}	2-5 区	2.21×10^{-5}
1-2 区	6.33×10^{-5}	3-1 区	2.47×10^{-3}
1-3 区	2×10^{-5}	3-2 区	1.25×10^{-4}
1-4 区	1×10^{-6}	3-3 区	2.35×10^{-3}
2-1 区	3.25×10^{-5}	3-4 区	2.73×10^{-5}
2-2 区	3.46×10^{-5}	4 区 (微风化层)	$< 1 \times 10^{-6}$
2-3 区	1.41×10^{-3}	5 区 (不透水层)	$< 1 \times 10^{-8}$
2-4 区	4.46×10^{-5}	防渗帷幕区	6.5×10^{-5}

3.4 计算工况及边界条件

选择水库正常蓄水工况进行三维稳定渗流模拟，大坝上游取正常蓄水位 190.50m，下游水位取 149.60m，下游水位以上河床面和坝坡作为自由溢出点通过软件计算迭代搜

索自由溢出面，模型两侧和底部视为不透水边界。

4 计算结果与分析

采用上述三维有限元模型，对正常蓄水位工况西音胶凝砂砾石坝坝体和坝基稳定渗流场进行数值模拟，主要成果见图 4、图 5 和表 3。

从图 4 可以看出：（1）坝体上游防渗层等水头线分布密集，几乎与上游坝坡平行，渗透水流穿过防渗层后，总水头急剧降低，坝体内部渗透压力小，表明坝体防渗层降水减压效果良好；（2）整体上坝基排水孔上游等水头线分布较密集，排水孔下游等水头线较稀疏，由坝体防渗层、坝基防渗帷幕和排水孔组成的渗控系统整体防渗效果良好；（3）对于坝基渗透系数较大（明显大于帷幕渗透系数）的坝段和区域，坝基进行帷幕灌浆防渗后，防渗帷幕区等水头线分布较密集，帷幕降水减压效果明显（见图 4（a）1-1 区、图 4（d）3-1 区和 3-3 区）；而对于坝基渗透系数较小（小于帷幕渗透系数或与帷幕渗透系数相当）的坝段或区域，帷幕区等水头线较稀疏、消杀压力水头效果不明显（见图 4c），说明防渗帷幕降水减压效果取决于帷幕与坝基的相对不透水性，帷幕相对于坝基透水性越弱，则防渗效果越好，降水减压效果越明显，反之则帷幕消杀压力水头的作用不明显。

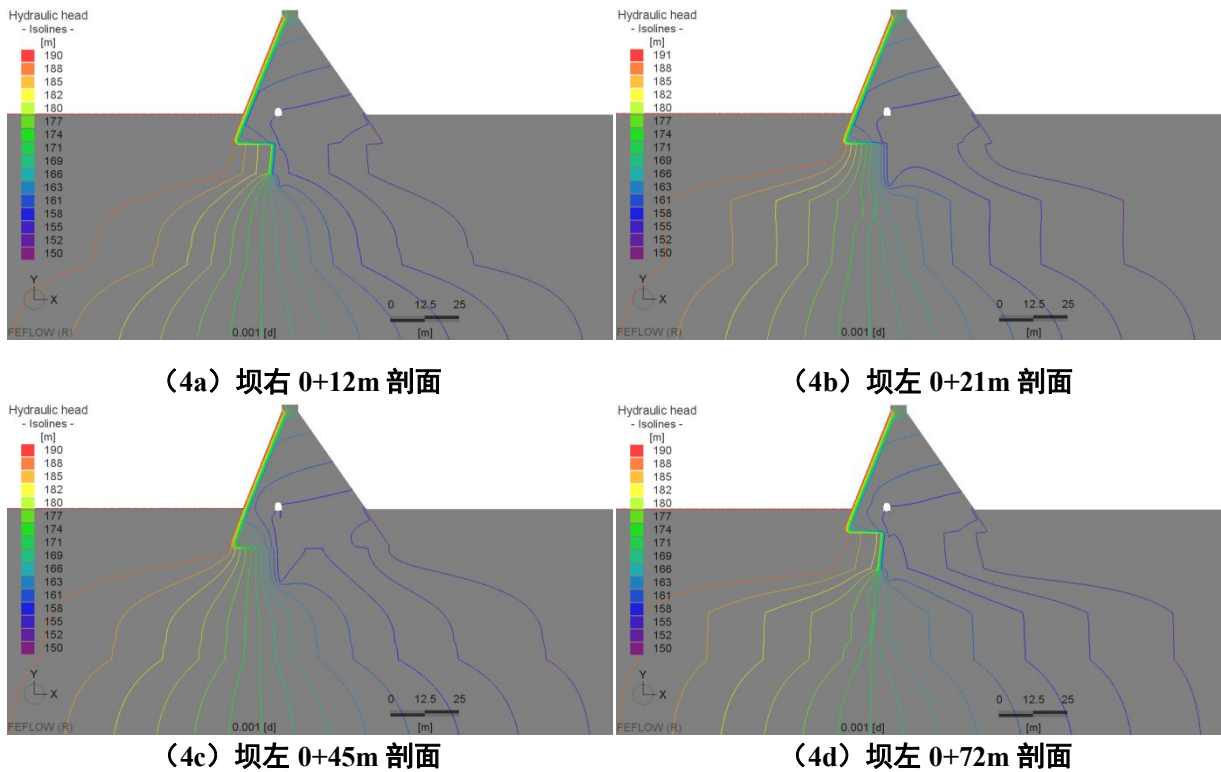


图 4 典型剖面等水头线分布

浸润线为一自由水面，浸润线上渗透压力为 0，因此通过分析渗透压力分布，可以得到坝体浸润线，如图 5。可见，正常蓄水位工况坝体浸润线未溢出。

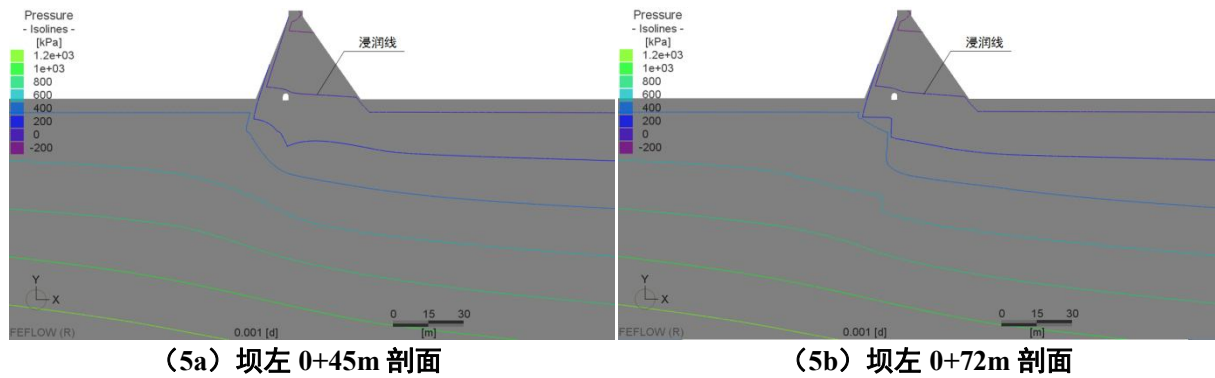


图 5 典型剖面渗透压力等值线分布

表 3 坝基渗透压力

剖面位置	渗透压力 (Kpa)					折减系数
	坝踵	帷幕前	帷幕后	排水孔后	坝趾	
坝右 0+12m	444	344	140	134	55.4	0.34
坝左 0+21m	444	344	138	127	55.4	0.33
坝左 0+45m	483	211	183	142	86.9	0.36
坝左 0+72m	425	340	111	106	31	0.27

注：表中折减系数=排水孔后渗透压力/(坝踵渗透压力-坝趾渗透压力)

表 3 统计了典型断面坝基渗透压力，可知经防渗帷幕和排水孔幕，坝基渗透压力大幅消减，坝基渗透压力折减系数为 0.27~0.36。

通过渗流量统计分析得出，坝体渗流量十分小，几乎不渗水；坝基单宽渗流量为 $4.65\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ，廊道排水单宽流量为 $3.53\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ，坝基渗流量加廊道排水量合计为 $8.18\text{m}^3/(\text{d} \cdot \text{m})$ ，坝基渗漏量较小，廊道排水量也不大，经粗略估算远小于坝址历年最小月平均流量 ($0.198\text{m}^3/\text{s}$)，因此，坝体和坝基渗漏问题不大，不会影响水库正常蓄水功能。

5 结论

通过建立非溢流坝段三维有限元模型，并根据坝体浇筑材料的不同和坝基不同位置、不同地层渗透系数的差异，进行坝体和坝基分层分区，较好的实现了西音胶凝砂砾石坝渗流精细化模拟。通过对正常蓄水位工况稳定渗流有限元模拟分析，可以得出以下结论。

(1) 坝体和坝基渗流等水头线、渗透压力、浸润线等分布规律合理、形态正常，能较好的反映西音胶凝砂砾石坝非溢流坝段正常蓄水位稳定渗流场分布特点；

(2) 设计提出的坝体上游面防渗层及坝基防渗帷幕和排水孔联合防渗排水方案，消杀压力水头、降低坝基和坝内渗透压力作用明显、效果良好，渗控措施较为合理可行；

(3) 防渗帷幕降水减压效果取决于帷幕与坝基的相对不透水性，帷幕相对于坝基透

水性越弱，则降水减压效果越明显，反之则减压作用不明显；

(4) 不同坝段坝基透水性差异对坝基渗流场分布和渗控措施效果影响较明显，采用三维渗流模型，并根据透水性的差异对坝体和坝基进行精细化分层分区十分必要。

建议工程建成后做好渗流原型观测，必要时可基于原型观测资料并结合大坝三维渗流有限元模型开展工程后评估，为胶凝砂砾石坝渗流研究和防渗设计积累经验。

参考文献

- [1]何光同, 李祖发, 俞钦.胶凝砂砾石新坝型在截面量水堰中的研究和应用[C].福建省水力发电工程学会 2006 年学术年会汇编, 2006.12: 3-6.
- [2]刘文拯, 何蕴龙, 尹鹏.Hardfill 坝渗流场数值分析[J].武汉大学学报, 2008, 41 (2): 5-10.
- [3]张凤德, 李秀文, 彭云枫, 王万顺.胶凝砂砾石坝防渗措施及应力分析[J].中国水利水电科学研究院学报, 2015, 13 (3): 194-200.
- [4]寇自洋.基于 ADINA 的胶凝砂砾石坝的深流分析[D].华北水利水电大学, 2018.
- [5]孙亮.龙华河碾压混凝土重力坝三维渗流场分析及渗控措施研究[D].清华大学, 2008.
- [6]李庆伟, 晏鄂川, 杨广, 崔学杰.基于 FEFLOW 的岸坡地下水三维渗流场模拟研究[J].安全与环境工程, 2019, 26(2): 38-44.
- [7]贺国平, 邵景力, 崔亚莉, 张德强.FEFLOW 在地下水流模拟方面的应用[J].成都理工大学学报, 2003, 30(4): 356-361.
- [8]刘洋, 何建东.祁东矿松散层下第四含水层地下水流场三维数值模拟[J].皖西学院学报, 2013, 29(5): 97-99.
- [9]朱伯芳.渗流场中考虑排水孔作用的杂交元[J].水利学报, 1982, (9): 32-41.
- [10]关锦荷, 刘嘉焯, 朱玉侠.用排水沟代替排水井列的有限单元法分析[J].水利学报, 1984, (3): 10-18.
- [11]杜延龄, 许国安, 韩连兵.复杂基岩三维渗流分析方法及其工程应用研究[J].水利水电技术, 1991, (1):10-18.
- [12]王镭, 刘中, 张有天.有排水孔幕的渗流场分析[J].水利学报, 1992, (4): 15-20.
- [13]王恩志, 王洪涛, 邓旭东.“以管代孔”——排水孔模拟方法探讨[J].岩石力学与工程学报, 2001, 20(3): 346-349.
- [14]王恩志, 王洪涛, 王慧明.“以缝代井列”——排水孔模拟方法探讨[J].岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 98-101.
- [15]胡静, 陈胜宏.渗流分析中排水孔模拟的空气单元法[J].岩土力学, 2003, 24(2): 281-283.

Three-dimensional finite element seepage analysis of XiYin Cemented Sand Gravel dam in Putian

Hou-xing Xia

(Fujian Provincial Investigation, Design & Research Institute Of Water Conservancy & Hydropower Fujian Fuzhou 350001 China)

Abstract: Aiming at the preliminary design scheme of Xiyin cemented gravel dam project, based on FEFLOW groundwater simulation software, a three-dimensional seepage finite element model of non-overflow dam section with fine layering and division of the dam body and dam foundation was established, and a numerical simulation study of the stable seepage field. Through calculation and analysis of seepage and other head lines, seepage pressure, infiltration line and seepage flow, etc., the rationality and effect of dam body and dam foundation anti-seepage and drainage measures are verified, which can provide reference for engineering construction design.

Key words: Cemented Sand Gravel dam; Three-dimensional seepage; Finite element; FEFLOW; Anti-seepage drainage

夏厚兴 (1989-), 男, 湖北麻城人, 工程师, 主要从事水动力研究工作。

通讯地址: 福州市鼓楼区东大路 158 号。电话: 15005059036。E-mail: 1059844030@qq.com