尾矿库渗流分析中渗水井排水单元直接模拟法*

侯攀[1,2],陈宇清[1,2],田文高[1,2],王明明[1,2],黄文鹤[3]

(1.中冶沈勘秦皇岛工程设计研究总院有限公司, 河北 秦皇岛市 066004;
2.河北省绿色智能矿山工程设计技术创新中心, 河北 秦皇岛市 066004;
3.鞍山钢铁集团有限公司齐大山选矿厂, 辽宁 鞍山市 114001)

摘要:对渗流场有限元计算的排水孔单元模拟方法进行了归纳总结,在此基础上,提出了尾矿库渗水井排水单元直接模拟法。该方法是在计算之初一次性建立包含渗水井优化参数的实体网格模型,之后通过设置不同内部边界条件将渗水井优化单元提前分组;在渗流场有限元求解计算时,可只进行一次渗透传导矩阵凝聚工作,计算过程中各分组节点信息均按照第一类已知水头边界条件进行处理,整个过程易于编程且求解速度快。与工程常用的隐式复合单元法或改进的排水子结构等方法相比,该方法通过参数优化设置极大地提高了建模及求解效率,同时通过精细化模拟渗水井尺寸效应,极大地提高计算精度。最后,通过完整井算例和具体工程实例验证了该方法的计算精度能够满足工程要求。

关键词:尾矿库;渗流场;渗水井;排水单元;直接模拟法
中图分类号:TD743;TV223.4 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)08-0151-08

Direct Simulation Method of Seepage Well Drainage Unit in Seepage Analysis of Tailings Pond

Hou Pan[1,2], *Chen Yuqing*[1,2], *Tian Wengao*[1,2], *Wang Mingming*[1,2], *Huang Wenhe*[3]

(1.Shen Kan Qinhuangdao General Engineering Design & Research Institute Corporation, MCC, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;
2.Hebei Green Smart Mine Design Technology Innovation Center, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;
3.Qidashan Concentrator of Anshan Iron and Steel Group Co., Ltd., Anshan, Liaoning 114001, China)

Abstract: The simulation method of drainage hole unit for finite element calculation of seepage field was summarized. On this basis, the direct simulation method of drainage unit for seepage well of tailings pond was proposed. This method establishes a solid mesh model containing optimization parameters of seepage wells all at once at the initial stage of calculation. Afterwards, the optimized elements of seepage wells were grouped in advance by setting different internal boundary conditions. During the finite element solution of the seepage field, the condensation of permeability conduction matrix only needs to be performed once. In the calculation process, the node information of each group was processed according to the first kind of known head boundary conditions. The whole process is easy to program and features fast solving speed. Compared with commonly used engineering methods such as the implicit composite element method and the improved drainage substructure method, the proposed method significantly improves the efficiency of modeling and solution through optimized parameter settings. Meanwhile, it greatly enhances computational accuracy by finely simulating the size effect of seepage wells. Finally, the calculation accuracy of the method is verified to meet the engineering requirements through a fully penetrating well example and a specific engineering case.

Key words: Tailings pond, Seepage field, Seepage well, Drainage unit, Direct simulation method

0 引言

在尾矿库设计过程中,排渗设施渗流场的快速准确模拟是一项重要的工作[1-5]。以渗水井降渗措施为例,常用的渗水井内径一般为0.1~1.5 m,井间距为5~15 m,与尾矿坝整个渗流场相比,渗水井单元模型径向尺寸很小,而纵向尺寸较长,对其渗流特性进行精确模拟较为困难。在早期的渗流研究中常将排水孔概化为定水头边界。针对渗流场的分析,一些学者提出了计算方法[6-11]。

为了得到最优的渗水井降渗方案,研究人员需要不断对渗水井空间位置、径向尺寸及纵向深度等参数进行调整并反复试算。目前较为常用的改进排水子结构法虽然可对选定的渗水井单一方案进行快

* **收稿日期**:2025-08-20
作者简介:侯攀(1982—),男,河南开封人,硕士,高级工程师,主要从事矿山尾矿设施咨询设计及研究工作。E-mail:Housanxin2003@163.com
通信作者:陈宇清(1984—),女,山西忻州人,硕士,高级工程师,主要从事矿山尾矿设施咨询设计及研究工作。E-mail:641003945@qq.com

速计算,但遇到渗水井设计参数优化调整计算时,有一定局限性。此外,因渗水井出流能力与井内排水设施的排水能力密切相关,使得求解井内稳定水头的过程较为繁琐。

针对尾矿库渗水井优化设计及计算工作重复繁琐等问题,本文提出渗水井排水单元直接模拟法。该方法是在计算之初一次性建立包含渗水井优化参数的实体网格模型,通过设置不同内部边界条件,将渗水井优化单元提前分组,并根据优化方案设置计算工况。在进行有限元渗流计算时,可只建立一次整体网格模型和渗透传导矩阵,之后按照预设的各分组信息自动进行计算及成果输出。该方法优点是在有限元计算过程中将各分组单元信息按照第一类已知水头边界条件进行处理,仅在计算之初增加一些分组信息整理工序,整个计算过程和成果输出过程均可实现自动化。经实例验证该方法可以较好地模拟渗水井渗流特性,计算精度可以满足工程使用要求。

1 基本原理

尾矿坝渗水井渗流计算是在已知定解条件下求解渗流基本方程,以求出坝体内部渗流场的水头分布,进而计算渗流量和渗透水力坡降等[12-13]。本研究的渗流场自由面求解采用基于固定网格的节点虚流量法,渗水井模拟采用排水单元直接模拟法,渗水井流量计算采用等效节点流量法[14-17]。

1.1 基本微分方程和边界条件

尾矿坝渗水井渗流计算一般按照稳定饱和渗流场进行计算,基本微分方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\boldsymbol{k}_{ij}^{s}\frac{\partial h}{\partial x_j}\right)-Q=0 \tag{1}$$

式中:$\boldsymbol{k}_{ij}^{s}$ 为饱和渗透系数张量,m/s;h 为总水头,m;Q 为源汇项,m^3/s。

对于稳定渗流场,其边界条件如下:

$$h_c(x,y,z,t)\mid_{\Gamma_1}=h_{c1}(x,y,z,t) \tag{2}$$

$$-\left[\boldsymbol{k}_{ij}^{s}k_r(h_c)\frac{\partial h_c}{\partial x_j}+\boldsymbol{k}_{i3}^{s}k_r(h_c)\right]n_i\Big|_{\Gamma_2}=q_n \tag{3}$$

$$-\left[\boldsymbol{k}_{ij}^{s}k_r(h_c)\frac{\partial h_c}{\partial x_j}+\boldsymbol{k}_{i3}^{s}k_r(h_c)\right]n_i\Big|_{\Gamma_3}\geqslant 0$$

$$h_c\mid_{\Gamma_3}=0 \tag{4}$$

式中:$h_c(x,y,z,t)$ 是边界上任意点的渗流水头函数;h_{c1} 是边界上预先给定的已知水头分布函数;n_i 为边界面外法线方向余弦;q_n 为边界面法向流量;Γ_1 为渗流场的已知节点水头边界;Γ_2 为渗流场的已知流量边界;Γ_3 为饱和逸出面边界;k_r 为介质相对渗透率。

1.2 自由面求解节点虚流量方法

尾矿坝渗水井渗流分析需要求解自由面,在实际工程中多采用基于固定网格的节点虚流量法进行计算。具体方法为:将计算区域分为渗流实域 Ω_1 和渗流虚域 Ω_2,压力水头在实域内大于或等于零,在虚域内小于零。而在有限元求解前,自由面位置是未知的,需要通过迭代求解自由面,迭代过程可按下式进行[18-20]。

$$[\boldsymbol{K}]\{h\}^{it}=\{\boldsymbol{Q}\}^{it}-\{\boldsymbol{Q}_2\}^{it}+[\boldsymbol{K}_2]^{it}\{h\}^{it-1} \tag{5}$$

$$[\boldsymbol{K}]\{h\}^{0}=\{\boldsymbol{Q}\}^{0} \tag{6}$$

式中:it 为迭代计算步数;$[\boldsymbol{K}_2]^{it}\{h\}^{it-1}$ 为虚域 Ω_2 对计算域 Ω 中所有未知节点水头贡献流量列阵。

1.3 等效节点流量法

等效节点流量法对应的计算公式为:

$$Q_S=-\sum_{i=1}^{n}\sum^{e}\sum_{j=1}^{m}k_{ij}^{e}h_j^{e} \tag{7}$$

式中:Q_S 为渗水井边界上的渗透流量;n 为过流断面 S 上的结点数;$\sum^{e}$ 表示对那些只位于过流断面一侧的环绕结点 i 的所有单元求和;m 为单元结点数。

2 基本方法和步骤

2.1 渗水井排水单元直接模拟法

渗水井排水单元直接模拟方法基本流程和步骤如下。

(1) 在进行尾矿库渗水井渗流计算分析建模时,对渗水井及其周边特定区域进行有限元结构单元剖分。

(2) 进行渗水井结构单元剖分时,结合优化参数建立模型。要求建立的模型能准确反映渗水井三维尺寸效应,如能反映渗水井孔径变化、深度变化及位置变化等。

(3) 对于完成剖分后的渗水井及其周边特定区域的模型,将其外部区域节点与整体有限元网格模型直接对应连接。根据渗水井不同空间位置、不同径向尺寸及不同纵向深度等参数将内部区域渗水井单元进行分组,视每一组为一个“超单元”。

(4) 对于某一特定工况,整理渗水井“超单元”信息。提取特定工况渗水井边界节点信息并指定水头(内部源、汇项)后,按第一类边界条件代入整体渗透系数矩阵进行求解(见式(2));提取各组渗水井边界面域信息,并按照内部边界面采用等效节点流量法进行渗出流量求解。

(5) 通过循环计算,分别对各组渗水井“超单元”进行整理,并指定边界节点水头,最后求解各组

渗水井“超单元”指定节点水头后的渗出流量。

(6) 对各组渗水井“超单元”计算结果进行整理,绘制渗流量-水头曲线图;渗水井一般通过设置在井内的水泵稳定抽排或采用导水管自由排水,根据已知排水条件可绘制排水量-水头曲线图。在曲线图中可直接查询得出稳定水头,该水头即所求渗流场最终解。

2.2 程序编制流程

在渗水井排水单元直接模拟方法计算过程中,针对各种渗水井设置工况仅需建立一套计算网格模型,同时在有限元计算过程中,整体渗透矩阵的凝聚和整理也仅在初始阶段进行一次。计算各工况时,只需将特定分组渗水井“超单元”边界节点水头按第一类边界条件代入计算方程组求解。该方式使整个渗水井方案优化计算过程自动化,可大幅提高计算速度。具体程序编制流程如图 1 所示。

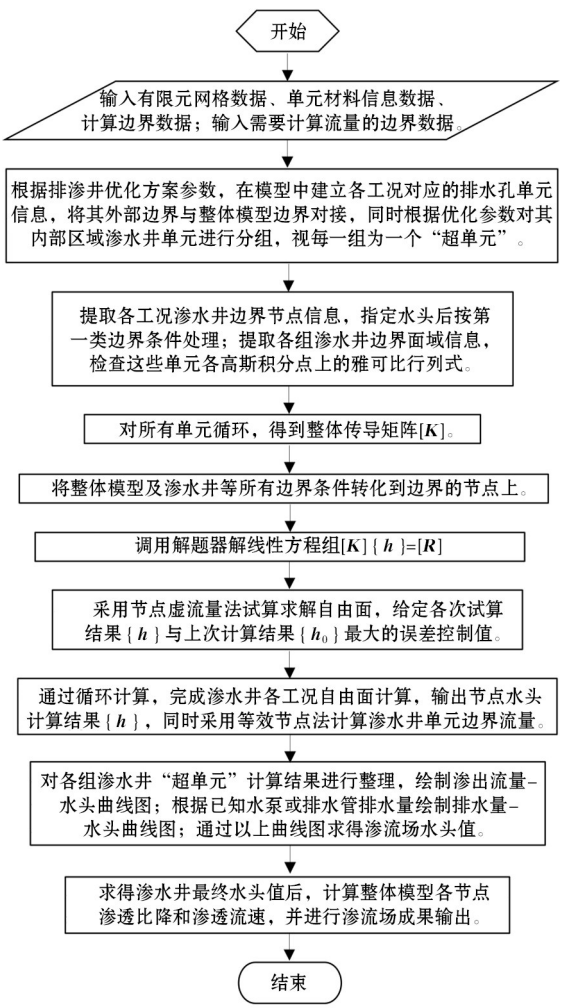


图 1 渗水井排水单元直接模拟法流程

Fig.1 The process of seepage well drainage unit direct simulation

3 算例

为了检验渗水井排水单元直接模拟方法正确性,选取一典型渗水井工程进行计算,并用水力学解析解进行对比验证。图 2 为一水平不透水层上的普通完整井,井的半径 $r_0=0.2$ m,含水层厚度 $H=8.0$ m,渗透系数 $k=0.000\ 6$ m/s。抽水一段时间后,井中的水深 $h_0=4.0$ m。

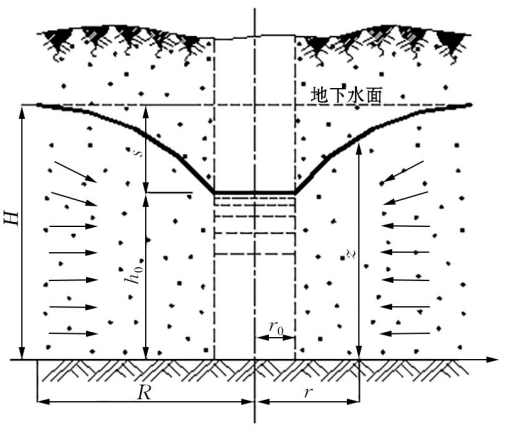


图 2 普通完整井算例示意

Fig.2 Example of ordinary complete well

3.1 水力学解析解计算

普通完整井解析解渗流 Q 量计算公式如下:

$$Q=1.36\frac{k(H^2-h_0^2)}{\lg\frac{R}{r_0}} \tag{8}$$

式中:k 为渗透系数;H 为含水层厚度;h_0 为井中水深;R 为井的影响半径;r_0 为井的半径。

井的影响半径 R 主要取决于土壤的性质,本文按下式计算:

$$R=3\ 000\cdot s\sqrt{k} \tag{9}$$

式中,s 为井水面降落值。

根据算例完整井参数计算井渗流量,通过计算可知井内水深为 4 m 时渗流量为 0.012 4 m^3/s。

根据以上公式,可进一步计算出井内不同水深时的对应渗流量,具体计算结果见表 1。

表 1 普通完整井流量解析解计算结果

Table 1 Analytical solution calculation results of ordinary complete well flow

井内水头 h_0/m	渗流量 Q/(m^3/s)
2	0.014 6
3	0.013 7
4	0.012 4
5	0.010 5
6	0.008 0
7	0.004 8
8	0.000 0

3.2 渗水井排水单元直接模拟法计算

采用渗水井排水单元直接模拟方法建立完整井计算模型。计算模型均采用 8 节点 6 面体单元,渗水井模型采用“蝶”形网格,总单元数为 18 360 个,总节点数为 20 451 个。渗水井单元总数为 608 个,其外表面个数统计为 580 个,相应节点个数为 2 211 个。渗水井内径为 0.4 m,其内部单元纵向尺寸均为 1 m,平面最大网格尺寸为 0.05 m×0.08 m,渗水井周边最小单元尺寸为 0.03 m×0.03 m。渗水井整体网格模型见图 3。放大后的渗水井单元网格模型见图 4。渗水井分组网格模型见图 5。

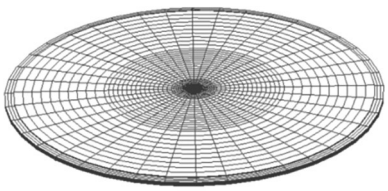


图 3 整体网格模型

Fig.3 Overall grid model

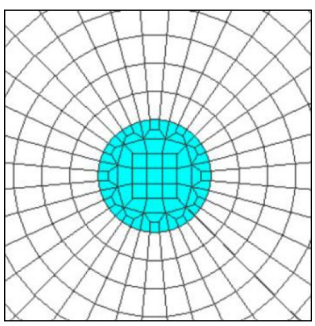


图 4 渗水井单元网格模型正视图

Fig.4 Amplification of seepage well unit mesh model

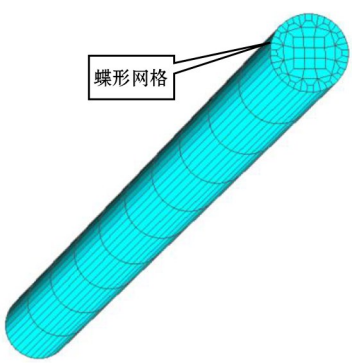


图 5 渗水井“超单元”分组网格模型

Fig.5 “Super-unit” grouped grid model of seepage well

将渗水井“超单元”边界节点水头按指定水头进行有限元试算求解,采用等效节点流量法计算渗水量。在计算过程中,为了便于数据对比分析,采用常规有限元计算方法对该算例进行了渗流量计算,最终计算结果及对比数据见表 2 和图 6。

表 2 各方法计算的渗流量结果

Table 2 The results of seepage flow calculated by various methods

渗水井水头值/m	水力学解析解计算渗出量/(m^3/s)	直接模拟计算渗出量/(m^3/s)	直接模拟计算渗入量/(m^3/s)	常规计算渗出量/(m^3/s)	常规计算渗入量/(m^3/s)
2	0.014 6	0.017 3	0.017 0	0.019 2	0.020 0
3	0.013 7	0.015 8	0.015 1	0.017 6	0.018 3
4	0.012 4	0.013 2	0.013 1	0.014 8	0.015 7
5	0.010 5	0.010 7	0.010 5	0.012 1	0.012 4
6	0.008 0	0.007 5	0.007 3	0.008 4	0.008 8
7	0.004 8	0.003 8	0.003 8	0.004 3	0.004 6
8	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

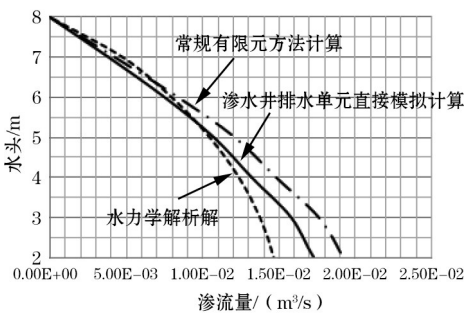


图 6 各方法计算的渗流量结果

Fig.6 The results of seepage flow calculated by various methods

3.3 结果分析

(1) 由表 2 和图 6 可知,与水力学解析解方法的计算结果相比,当渗水井内部水头为 4 m 时,渗水井排水单元直接模拟方法的渗出流量计算误差为 6.45%,常规有限元方法的计算误差为 19.35%;当渗水井内部水头为 2 m 时,误差达到最大值,此时渗水井排水单元直接模拟方法最大误差值为 18.49%,常规有限元方法计算最大误差为 31.51%。与常规有限元计算方法相比,采用渗水井排水单元直接模拟方法计算得到的渗出流量值更趋近于水力学解析解,与常规有限元方法相比,最大计算误差降低了约 13 个百分点。

(2) 经统计,采用渗水井排水单元直接模拟法计算各水头工况流量的总时长为 167 s,而采用常规有限元方法计算流量的总时长为 307 s。因渗水井排水单元直接模拟法计算过程中整体渗透矩阵仅凝聚一次,较常规有限元计算法的计算时间缩短约 45%。

(3) 通过整体计算模型渗出水量和渗入水量对比分析及与解析解对比分析可知:渗水井排水单元直接模拟方法可以较好地模拟渗水井空间尺寸效应;渗流量计算误差能够满足工程应用的精度要求。

4 工程应用

4.1 工程概况

某尾矿库的 3 号副坝初期坝为不透水浆砌石坝,初期坝坝顶标高 155 m,顶宽 7.5 m,上游坡比为 1∶0.35,下游坡比为 1∶0.7。初期坝浆砌石采用 M15 水泥砂浆砌筑,坝基开挖至基岩,在坝体上游侧设置 0.6 m 厚的混凝土防渗面板。3 号副坝的最终堆积标高为 200 m,堆积坝外边坡平均坡比为 1∶4。为控制堆积坝内部浸润线埋深,在初期坝前 50 m 处的尾砂体内部设置垂直-水平联合排渗体。其中,垂直排渗体采用排渗砂井型式,间距为 10 m,内径为 1.0 m;水平排渗体采用排渗盲沟型式,断面为圆形结构,内径为 1.0 m,最低点标高 136 m。垂直-水平联合排渗体外侧包裹一层 350 g/m^2 的土工布作为反滤层。排渗体渗水通过预埋的 2 根 DN 100 的 PE 导流管导入下游集水池。

渗流计算时沿轴线选取 100 m 长的典型坝段进行模拟,概化分区由下至上主要包括中风化岩、强风化岩、角砾层、尾粉质黏土、尾粉土、尾粉砂 1 和尾粉砂 2 等,初期坝体主要概化为浆砌石坝区和防渗面板区。各分区材料的渗透系数见表 3。有限元计算模型均采用 8 节点 6 面体单元,总单元数为 15 509 个,总节点数为 18 260 个。有限元计算模型如图 7 所示。

表 3 各分区材料的渗透系数

Table 3 Permeability coefficient of materlals in various partition

材料	水平渗透系数/(m/s)	垂直渗透系数/(m/s)
浆砌石	5.00×10^{-7}	5.00×10^{-7}
混凝土面板	1.00×10^{-8}	1.00×10^{-8}
土工布	2.76×10^{-4}	2.76×10^{-4}
尾粉砂 1	2.25×10^{-5}	1.33×10^{-5}
尾粉砂 2	2.72×10^{-5}	1.73×10^{-5}
尾粉土	8.54×10^{-5}	6.25×10^{-5}
尾粉质黏土	2.77×10^{-7}	2.77×10^{-7}
角砾	7.50×10^{-4}	7.50×10^{-4}
强风化岩	2.20×10^{-4}	2.20×10^{-4}
中风化岩	2.00×10^{-9}	2.00×10^{-9}

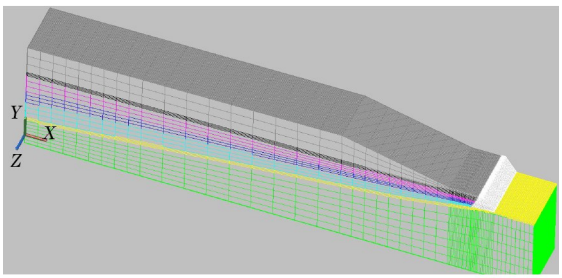


图 7 有限元计算模型

Fig.7 Finite element calculation model

有限元计算时,垂直-水平排渗体模型均采用排水单元直接模拟法。图 8 所示为一典型排渗体“超单元”分组情况,其中 10 座渗水井与底部水平排渗体连接为一个整体并定义为一组“超单元”,水平排渗体最低点标高为 142 m,渗水井顶标高为 155 m,渗水井内径为 1.0 m,间距为 10 m。经统计,该工况“超单元”外表面个数为 630 个(用于等效节点流量法渗流量计算),相应节点为 680 个(试算过程中按第一类边界条件指定水头值)。

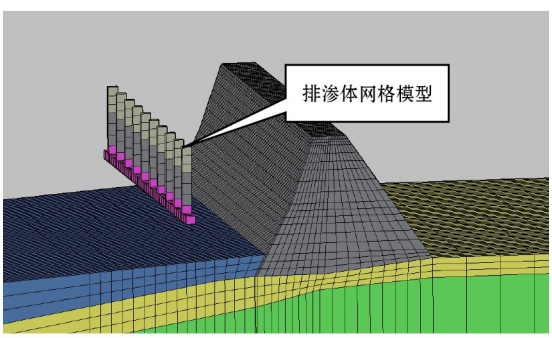


图 8 排渗体排水单元直接模拟法网格模型

Fig.8 Gird model of drainage body for drainage unit direct simulation method

4.2 计算条件

尾矿库运行至最终设计标高 200 m 时,上游最高洪水位为 196.53 m,下游外坝脚标高为 126.79 m。计算模型的渗流边界条件为:

(1) 基岩底部边界为不透水边界;

(2) 上游 196.53 m 标高以下的边界面及下游 126.79 m 标高以下的边界面为第一类已知水头边界;

(3) 初期坝外侧面为可能逸出边界;

(4) 排渗体“超单元”外侧面为试算水头边界(每次试算时按第一类已知边界处理)。

4.3 计算结果

(1) 排渗体水头试算结果。

每次试算时排渗体“超单元”边界节点水头按

指定水头处理,采用等效节点流量法对排水井“超单元”边界面进行计算并求出排渗体渗水量,最终整理各试算结果后可绘制排渗体渗流量-水头曲线图。

对于完成分组的排渗体“超单元”,因采用的是2根DN 100的PE导水管自流排水,可采用管道水力学方法计算其排水量,并绘制导水管排水量-水头曲线图。

利用得到的渗流量-水头曲线和排水量-水头曲线(见图9),可查得稳定出流水头为144.1 m,单组排渗体小时渗水量为132 m^3。

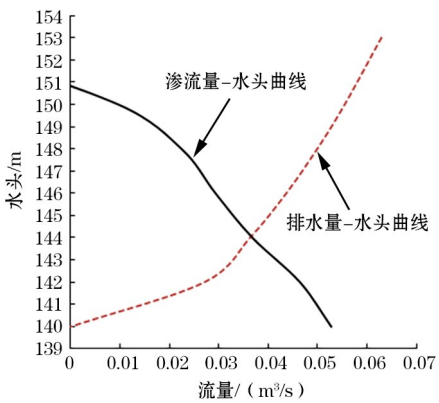


图9 渗流量-水头和排水量-水头曲线

Fig.9 Seepage-head and displacement-head curves

(2) 根据试算结果求得最终渗流场。

在求得排渗体内稳定水头后,可进一步求解得到渗流场浸润线、渗透流速及渗透坡降,具体计算结果见图10至图12。

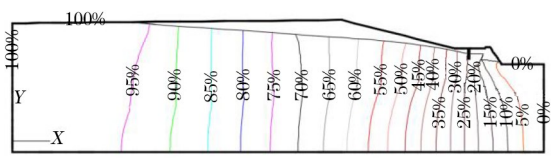


图10 典型剖面上的浸润线及等势线

Fig.10 Saturation line and equipotential line on typical section

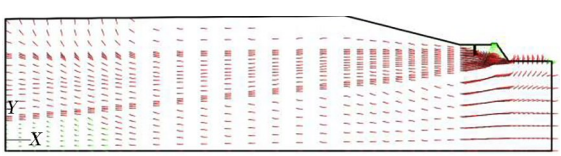


图11 典型剖面渗透流速计算结果

Fig.11 Calculation results of seepage velocity on typical section

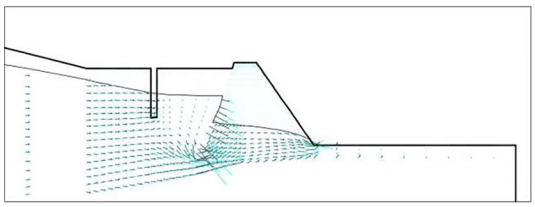


图12 排渗体及上游防渗面板处的渗透坡降

Fig.12 Seepage gradient at the drainage body and upstream anti-seepage panel

根据图9可知,在排渗体失效时,排渗体位置水头值为150.9 m,此时坝体内部浸润线将在153 m标高平台逸出,如图13所示。

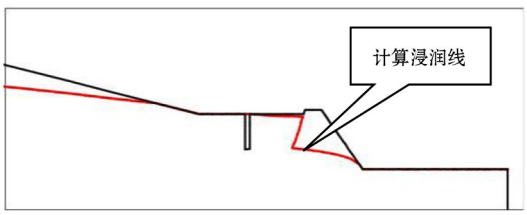


图13 排渗体失效时浸润线渗流逸出情况示意

Fig.13 Seepage escape of seepage line when drainage body fails

根据计算结果可得出如下结论。

(1) 在未设置排渗体的情况下,因3号副坝上游设置防渗面板,浸润线将在堆积坝153 m标高平台逸出,浸润线埋深不能满足规范要求。

(2) 在排渗体正常运行条件下,因导水管出流能力限制,排渗体位置浸润线水头值为144.1 m,此时堆积坝153 m标高浸润线最小埋深值为4.7 m,可满足规范埋深要求。

(3) 渗透坡降极值位于堆积坝排渗体上游侧、初期坝上游防渗面板下部位置、初期坝内坝脚位置和初期坝外坝面坝脚部位,排渗体上游侧尾砂体、初期坝上游防渗面板下部位置、初期坝脚内坝脚基岩部位和初期坝脚外坝脚基岩部位的渗透坡降计算结果最大值分别为0.25,16.7,0.94和0.72,各部位的渗透坡降计算值均满足允许渗透坡降的要求。渗透流速极值与渗透坡降极值类似,均能满足工况设计要求。建议工程实施过程中在以上重点部位做好反滤或排水措施,在初期坝下游和防渗面板下游部位增设排水减压措施。

(4) 排渗设施小时渗水量为132 m^3,采用2根DN 100的PE导水管自流排水可以满足设计要求。为了进一步降低浸润线埋深并提升排水设施可靠

度,建议在现有2根导水管的基础上再增设2根导水管,并进行三工一备使用。

5 结语

渗水井排水单元直接模拟法是采用8节点6面体单元建立能够准确反映渗水井三维尺寸效应的网格模型并预设分组,在渗流场有限元求解计算时只进行一次渗透传导矩阵凝聚工作,计算过程中各分组节点信息均按照第一类已知水头边界条件进行处理,整个过程易于编程且求解速度快。与工程中常用的隐式复合单元法或改进的排水子结构等方法相比,渗水井排水单元直接模拟法通过参数优化设置可极大提高建模及求解效率,同时通过精细化模拟渗水井尺寸效应,极大地提高了计算精度。完整井算例和具体工程实例验证表明:渗水井排水单元直接模拟法计算精度能够满足工程要求,在遇到如渗水井空间位置参数优化及渗水井结构参数优化等问题时,该方法具有显著优势;同时,该方法还适用于排渗盲沟、辐射井等各种尾矿库工程降渗措施的渗流计算。

参考文献(References):

[1] 陈嘉帅,刘小文.水平排渗管对尾矿堆积坝渗流场影响三维分析[J].轻金属,2020(2):1-8.
Chen Jiashuai, Liu Xiaowen. Influence of different drainage pipe arrangement schemes on the seepage line of seepage field in tailings reservoir[J]. Light Metals,2020(2):1-8.

[2] 满健铭,沈振中,陶东良,等.尾矿库加高扩容工程排渗飘管与土工席垫联合渗控效果评价[J].水电能源科学,2021,39(5):92-96.
Man Jianming, Shen Zhenzhong, Tao Dongliang, et al. Evaluation of seepage control effect of drainage pipe and geotechnical matcombined system of tailings pond heightening capacity expansion project[J]. Water Resources and Power,2021,39(5):92-96.

[3] 孙景鹏,宋春山,韩红卫,等.尾矿库三维渗流模拟及排渗设施对渗流场影响[J].金属矿山,2022(6):184-189.
Sun Jingpeng, Song Chunshan, Han Hongwei, et al. Three dimensional seepage simulation of tailings pond and the influence of drainage facilities on seepage field[J]. Metal Mine,2022(6):184-189.

[4] 崔皓东,周宁,井向阳,等.复杂地质条件下超深竖井的渗控措施及效果分析[J].人民长江,2024,55(10):166-172+181.
Cui Haodong, Zhou Ning, Jing Xiangyang, et al. Analysis on seepage control measures and their impact on an ultra deep foundation pit in complex geological conditions[J]. Yangtze River,2024,55(10):166-172+181.

[5] 张树茂,崔旋.库内软滩三维排渗设施对尾矿库渗流场的影响分析[J].中国矿业,2024,33(增刊1):157-163.
Zhang Shumao, Cui Xuan. Analysis of the influence of three-dimensional drainage facilitiesin the soft beach on the seepage field of tailings pond[J]. China Mining Magazine, 2024,33(Suppl.1):157-163.

[6] 赵冰,王光进,刘文连,等.尾矿库坝体三维渗流场的数值模拟与试验分析[J].有色金属工程,2020,10(8):99-106.
Zhao Bing, Wang Guangjin, Liu Wenlian, et al. Numerical simulation and experimental analysis of three-dimensional seepage fieldin tailings dam body[J]. Nonferrous Metals Engineering,2020,10(8):99-106.

[7] 李亚,高鹏飞.某尾矿库渗流分析与研究[J].中国矿业,2022,31(增刊1):123-126+145.
Li Ya, Gao Pengfei. Seepage analysis and research of a tailings pond[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(Suppl.1):123-126+145.

[8] 刘红岩,刘康琦,周月智,等.尾矿库渗流场及坝体稳定性的三维数值分析[J].矿业研究与开发,2023,43(11):129-136.
Liu Hongyan, Liu Kangqi, Zhou Yuezhi, et al. Three-Dimensional numerical analysis of the seepage field of the tailings reservoir and stability of the tailings dam[J]. Mining Research and Development,2023,43(11):129-136.

[9] 梁冰,曾勇,易富,等.尾矿坝渗流稳定性研究进展[J].长江科学院院报,2025,42(3):107-117.
Liang Bing, Zeng Yong, Yi Fu, et al. Advances in research of seepage stability of tailings dams[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2025,42(3): 107-117.

[10] 杨连枝,何蕃民,高阳.模拟排水孔列渗流行为的以沟代孔列延长渗径法研究[J].岩土力学,2017,38(1):180-188.
Yang Lianzhi, He Fanmin, Gao Yang. An extended seepage tracking method by slot instead of hole curtain for modeling seepage behaviors of drainage holes curtains[J]. Rock and Soil Mechanics,2017,38(1):180-188.

[11] 曾俊,李星,凌晓鸣,等.渗流分析中基于Signorini变分不等式结合杆单元法的排水孔模拟[J].中国农村水利水电,2019(10):169-174+179.
Zeng Jun, Li Xing, Ling Xiaoming, et al. Rod elements method based on variational inequality approach of Signorini type for simulating drainage holes in seepage analysis[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(10):169-174+179.

[12] 李强,高松,牛红凯,等.尾矿库浸润线解析解及适用性分析[J].岩土力学,2020,41(11):3714-3721+3756.
Li Qiang, Gao Song, Niu Hongkai, et al. Analytical solution to saturation line of tailings pond and its applicability analysis[J]. Rock and Soil Mechanics,2020,41(11):3714-3721+3756.

[13] 王玉林,谢康和,李传勋.未穿透覆盖层的自流井渗流模型与解析解[J].地下空间与工程学报,2020,16(2):439-444.
Wang Yulin, Xie Kanghe, Li Chuanxun. Mathematical model and analytical solution for flow in confined aquifer due to groundwater permeating through bottom of pumping well in overlying aquiclude[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2020,16(2):439-444.

[14] 闯喜宏,樊鑫成,秦慧凯.有自由面渗流问题的等效裂隙网络模型[J].人民长江,2024,55(3):184-189.
Chuang Xihong, Fan Xincheng, Qin Huikai. Equivalent fracture network modelfor seepage problem with free surface [J]. Yangtze River,2024,55(3):184-189.

[15] 陈玉婷,李三奇,袁乾峰.有自由面三维稳定渗流的等效管网模型[J].水电能源科学,2023,41(9):120-124.
Chen Yuting, Li Sanqi, Yuan Qianfeng. An equivalent pipe network model for three-dimensional steady seepage with free surface[J]. Water Resources and Power,2023,41(9):120-124.

[16] 刘远财,崔朋飞,张海容,等.基于改进 Level-Set 方法的非稳定渗流自由面数值模拟[J].水力发电学报,2023,42(11):68-77.
Liu Yuancai, Cui Pengfei, Zhang Hairong, et al. Numerical simulations of unsteady seepage free surface based on improved conservation Level-Set method [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2023,42(11):68-77.

[17] 李颖,陈天镭,张雄天,等.适用于降低和控制尾矿坝浸润线的面积法[J].金属矿山,2025(3):225-229.
Li Ying, Chen Tianlei, Zhang Xiongtian, et al. Reducing and controlling the infiltration line of tailings dam based on area method[J]. Metal Mine,2025(3):225-229.

[18] 戴前伟,孔重阳,雷轶,等.基于光滑有限单元法的土石坝无压渗流场数值模拟[J].水资源与水工程学报,2021,32(5):194-201.
Dai Qianwei, Kong Chongyang, Lei Yi, et al. Numerical simulation of unconfined seepage field of earth-rock dams based on smoothed finite element method[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2021, 32(5):194-201.

[19] 何朝葵,速宝玉,盛金昌,等.基于弱有限元法的渗流分析[J].岩土工程学报,2023,45(7):1526-1532.
He Chaokui, Su Baoyu, Sheng Jinchang, et al. Seepage analysis based on weak finite element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(7):1526-1532.

[20] 江巍,杨婷,欧阳晔,等.饱和无压渗流模型的虚拟单元法求解[J].工程科学与技术,2026,58(2):188-199.
Jiang Wei, Yang Ting, Ouyang Ye, et al. Virtual element method for saturated unconfined seepage flow analysis[J]. Advanced Engineering Sciences,2026,58(2):188-199.