

湿式尾矿库浸润线解析解的修正研究

胡凯文^{1,2}, 刘佳航^{1,2}, 李 强^{1,2}

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室, 河北 石家庄 050043)

摘要: 浸润线是影响尾矿库稳定的主要因素之一, 精确预测浸润线位置对于预防尾矿库失稳有重要意义。针对现有文献提出的湿式尾矿库的解析解, 采用柯钦娜理论式和法尔科维奇理论式对下游边界条件方程进行了修正, 结合修正后的上下游边界条件, 求解了修正后的尾矿库浸润线的解析解。利用有限元软件建立底坡为 0.05、0.1 以及初期坝内坡比为 1:2、1:1.5、1:1、1:0.577(60°)、1:0.5 的工况模型, 将文中解析解与数值解、文献解析解进行了对比。结果表明, 提出的解析解精度更高, 适用性更广。

关键词: 尾矿库; 浸润线; 修正解析解; 渗流场; 数值模拟

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2024)02-0119-08

0 引言

尾矿库是一个具有高势能的人造泥石流危险源, 存在溃坝危险, 一旦失事, 容易造成重大事故, 严重危害环境和人民的生命财产安全。美国克拉克大学研究表明, 在世界重大事故、公害隐患中, 尾矿库溃坝名列第 18 位, 仅次于核爆炸、核辐射等危害^[1]。2019 年 1 月, 巴西东南部米纳斯吉拉斯州发生铁矿石尾矿库溃坝事故, 库泄容量多达 1 200 万 m³, 造成了巨大的人员伤亡与经济损失^[2]。

很多学者对尾矿库浸润线进行了大量研究, 高亚伟等^[3]研究初期坝透水能力对尾矿坝浸润线埋深的影响, 当初期坝排渗能力降低时, 浸润线位置升高, 尾矿坝稳定性降低; 刘宁等^[4]发现地形、入库尾矿以及方矿管理等是影响上游式堆积坝浸润线埋深的主要因素, 提出了解决方案; 张平等^[5]利用有限单元法计算尾矿坝饱和与非饱和渗流, 分析了滩面长度对坝体浸润线埋深的影响; 王飞跃等^[6]通过分析浸润线的影响因素, 结合观测数据, 建立了浸润线叠加影响函数, 提出了反映阶段影响因子的浸润线矩阵; 尹光志等^[7]利用 2D-FLOW 软件, 对龙都尾矿库渗流模型进行了研究, 发现大气降水会影响尾矿库浸润线位置, 从而引起尾矿库的失稳; 李亮等^[8]根据尾矿库概化模型, 采用 FLAC 2D 软件对尾矿库稳定性进行了模拟, 发现尾矿库平均坡度以及浸润线埋深都会对坝体的安全系数产生影响; 王皓等^[9]将渗流计算区域渗透系数简化为常数, 通过傅里叶计数法确定尾矿库的浸润线; 赵怡晴等^[10]通过模型试验, 分析了降雨条件下的尾矿库浸润线的变化以及坝体的变形情况。目前随着人工智能的兴起, 学者们利用人工智能对尾矿库浸润线进行研究, 黄亚等^[11]根据尾矿库浸润线的流动特性, 建立了 2 种系统状态模型, 利用 Kalman 和 DE-Kalman 滤波算法进行估计, 证明了 DE-Kalman 滤波算法在浸润线监测中的可行性。XU et al^[12]通过遗传算法以及 BP 神经网络预测浸润线的变化趋势, 解决了尾矿库浸润线预测的非线性问题, 并通过试验验证了其先进性与实用性。相关研究发现也可以通过构建混合神经网络模型进行尾矿库风险评估以及浸润线位置监测^[13-16]。

综上所述, 有关尾矿库浸润线的研究主要集中在模型试验分析以及数值仿真与人工智能预测上, 而尾矿库浸润线的精确理论计算研究成果较少。目前已经有人提出了尾矿库浸润线的理论解析解, 李强

收稿日期: 2024-01-02 责任编辑: 车轩玉 DOI: 10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20240002

基金项目: 河北省重点研发计划(22375412D); 河北省自然科学基金(E2019210304, E2021210092)

作者简介: 胡凯文(2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为尾矿库浸润线理论计算。E-mail: 2534921661@qq.com

胡凯文, 刘佳航, 李强. 湿式尾矿库浸润线解析解的修正研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2024, 37(2): 119-126.

等^[17]建立了尾矿库浸润线的理论模型,采用能量方程和达西渗透定律推导了湿式尾矿库浸润线的微分方程,利用流网分布特征引入上下游边界条件方程,求解了尾矿库浸润线的解析解。而根据数模结果发现,流网分布特征在渗流出渗区表现不明显,计算结果对初期坝内坡角相关性过强,与实际情况不符。因此本文修正下游出渗区边界条件,完善修正湿式尾矿库浸润线解析解,并考虑初期坝内角及底坡等多因素对浸润线分布的影响,这对于多种类型的尾矿库研究以及实际工程应用具有重要意义,对尾矿库的改进优化提供了科学理论依据。

1 尾矿库浸润线微分方程推导

1.1 理论计算模型

由于尾矿库实际底坡分布较为复杂,对理论分析有较大困难,按照文献[15]对实际底坡进行简化,并建立如图 1 所示底坡倾斜的尾矿库简化模型。

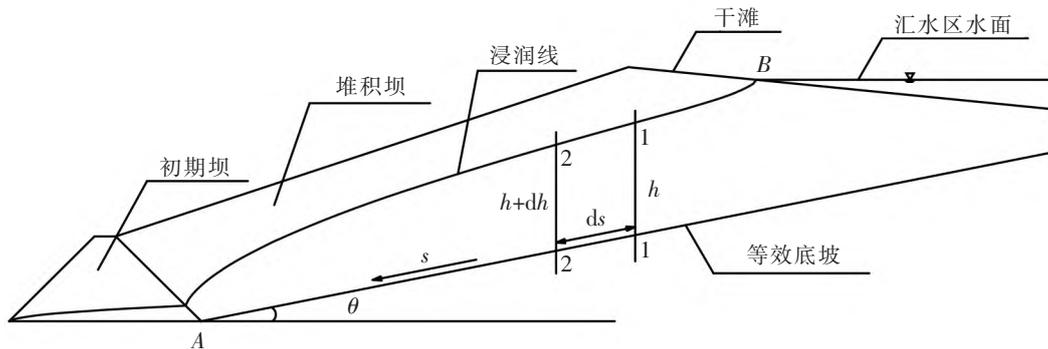


图 1 尾矿库浸润线计算理论模型

图 1 中, A 为初期坝内坡脚; B 为汇水区入渗点; h 为浸润线到底坡的水深; s 为渗流水沿等效底坡的流程长度(简称渗流长度); θ 为等效底坡线与水平地面的夹角; 1-1、2-2 为过水断面。

1.2 浸润线的理论推导

选取过水断面 1-1 和 2-2 之间微元体建立微分方程,其中 1-1 断面水深为 h , 2-2 断面水深 $h + dh$ 。根据杜比假定,建立能量方程得

$$h + ids = h + dh + Jds \quad (1)$$

式中, i 为尾矿库底坡面与水平面之间夹角的正弦值; J 为水力梯度。

整理式(1)得浸润线微分方程

$$J = i - \frac{dh}{ds} \quad (2)$$

引入达西渗透定律

$$Q = kJ\omega \quad (3)$$

式中, Q 为尾矿坝渗流水通过某过水断面的渗流流量; k 为坝体材料的渗透系数; ω 为该过水断面的面积。

对于图(1)中所取微元

$$\omega = bh \quad (4)$$

引入单宽流量 q

$$q = \frac{Q}{b} \quad (5)$$

结合式(3)一式(5),得到单位宽度过水断面的渗流流量

$$q = kJh \quad (6)$$

将式(6)代入式(2)中,可得浸润线的微分方程

$$\frac{dh}{ds} = i - \frac{q}{kh} \quad (7)$$

解微分方程(7)得浸润线微分方程

$$h + \frac{q}{k_i} \ln\left(\frac{q}{k_i} - h\right) = is + c \quad (8)$$

为求解未知量 q 与积分常数 c , 需要建立 2 个边界条件进行求解。

2 边界条件确定

在尾矿库渗流计算中,假定上下游流态之间互不影响,简化渗流求解过程。浸润线解析解计算模型如图 2 所示。当入渗点 B 与出逸点 D 之间的水平距离 $L \geq (2.5 \sim 3.5)$ 倍的人渗总水头时,根据渗流流态,可以将浸润线的分布分为 3 个区域,即入渗区、渗流区、出渗区。因入渗区及出渗区渗流过程较为复杂,为简化渗流计算,在入渗点以及出逸点处将浸润线延长,即增加一段附加渗径。基于此,可以采用达西定律得到浸润线的解析解。

图 2 中, h_0 为入渗水位; h_{01} 为等效入渗水位; ΔL_1 为上游区的附加渗径; ΔL_2 为下游区的附加渗径。

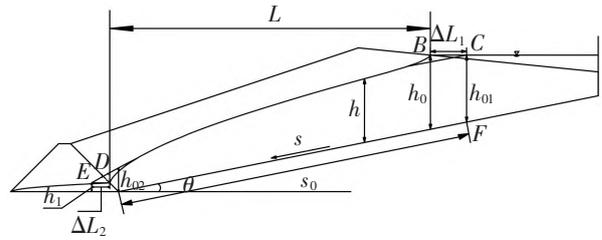


图 2 浸润线解析解计算模型

2.1 上游边界条件

针对上游附加渗径的计算,米哈伊洛夫^[18]根据流体力学,提出了半经验公式

$$\Delta L = \frac{m}{2m+1} H \quad (9)$$

式中, m 为沉积滩的边坡系数; H 为上游水深。但该方法中堤坝底坡为 0, 不适用于底坡倾斜的尾矿库模型。因此对该经验公式进行修正, 上游附加渗径 ΔL_1 为

$$\Delta L_1 = \frac{1}{2+k_c} h_0 \quad (10)$$

式中, k_c 为沉积滩的坡比; h_0 为浸润线在入渗点 B 处的水深。此时 C 点为浸润线的等效入渗点, 定义其在等效底坡上对应的点 F 为渗流流程起点, 即 $s=0$ 。可建立上游边界水位方程为

$$\begin{cases} s=0 \\ h=h_{01} \end{cases} \quad (11)$$

2.2 下游边界条件

对于下游边界条件, 渗流水在流经初期坝 A 点断面处时, 材料的渗透系数会发生突变, 导致渗流流速发生突变, 引发跌水现象。渗流流态由渐变流转变为急变流, 浸润线微分方程(8)不再适用。因此延长下游浸润线, DE 段为附加渗径, 不考虑初期坝渗透系数对渗流的影响。建立 AE 渗流段浸润线方程, 满足杜布依方程式

$$\frac{q}{k} = \frac{h_{02}^2 - h_1^2}{2(L + \Delta L_2)} \quad (12)$$

式中, k 为堆积坝材料的渗透系数; h_1 为出逸点 D 处水深; h_{02} 为下游边界水位。

建立 L 与 h_1 的三角函数关系式

$$L = \frac{h_1}{\tan \beta} = mh_1 \quad (13)$$

式中, m 为初期坝内坡面的边坡系数, 在数值上等于初期坝内坡坡比的倒数。

建立 ΔL_2 与流量 q 的关系式

$$\Delta L_2 = \alpha \frac{q}{k} \quad (14)$$

式中, 比例系数 α 与边坡系数 m 的关系式^[19]

$$\alpha = \frac{0.0577}{1 + 0.364m^{1.25}} \quad (15)$$

将式(13)、式(14)、式(15)代入式(12)中,得

$$h_{02}^2 = h_1^2 + 2mh_1 \frac{q}{k} + 2\alpha \left(\frac{q}{k}\right)^2 \quad (16)$$

由于出逸点 D 处水位 h_1 仍未知,现引入柯钦娜^[20]理论式,建立流量与出逸点水位关系

$$\frac{q}{k} = \mu h_1 \quad (17)$$

式中,系数 μ 的表达式参考法尔科维奇理论式^[20]为

$$\frac{1}{\mu} = \frac{4}{\pi^2} \sin \sigma \int_0^{\pi/2} \cot^{1-2\frac{\sigma}{\pi}} \theta \ln \left(\cot \frac{\theta}{2} \right) d\theta \quad (18)$$

将式(17)代入式(16)中,得到修正后下游边界水位方程

$$\begin{cases} s = s_0 \\ h = h_{02} = \frac{q}{k} \sqrt{\left(\frac{1}{\mu}\right)^2 (1 + 2m\mu) + 2\alpha} \end{cases} \quad (19)$$

式中,参数 α 、 μ 可通过式(15)、式(18)计算求解。

将上、下游边界条件方程(11)、式(19)代入浸润线微分方程(8)中,得到关于 q 和 c 的方程为

$$\begin{cases} h_{01} + \frac{q}{ki} \ln \left(\frac{q}{ki} - h_{01} \right) = c \\ \frac{q}{k} \sqrt{\left(\frac{1}{\mu}\right)^2 (1 + 2m\mu) + 2\alpha} + \frac{q}{ki} \ln \left(\frac{q}{ki} - \frac{q}{k} \sqrt{\left(\frac{1}{\mu}\right)^2 (1 + 2m\mu) + 2\alpha} \right) = is_0 + c \end{cases} \quad (20)$$

求解方程组(20)可得未知参数 q 和 c 的值,代入方程(8)中可得浸润线解析解。

3 解析解的验证分析

3.1 工况模型选取

尾矿库初期坝为透水性坝体,初期坝高为 20 m,堆积坝平均外坡比为 1:4,堆积坝高 60 m,沉积滩坡比为 1%,干滩长度为 150 m。上游汇水区设置总水头为 78.5 m 的水力边界条件,下游初期坝外坡处设置排水边界条件。尾矿库筑坝材料如表 1 所示。

表 1 尾矿库筑坝材料物理力学参数

尾矿库区域	材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	饱和体积含水量	渗透系数 $k/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
初期坝	砂	2 500	0.430	1.0×10^{-4}
堆积坝	粉砂	1 800	0.486	2.5×10^{-6}

选取多组不同初期坝内坡比以及不同底坡的工况模型进行研究,研究工况如表 2 所示。

表 2 不同底坡与初期坝内坡比条件下研究工况

初期坝内坡比	底坡	
	0.05	0.1
1:2	工况 1-a	工况 1-b
1:1.5	工况 2-a	工况 2-b
1:1	工况 3-a	工况 3-b
1:0.577(60°)	工况 4-a	工况 4-b
1:0.5	工况 5-a	工况 5-b

3.2 误差计算

尾矿库的稳定性可通过分析浸润线最小埋深进行确定,在有限元软件 Geostudio 上进行数值模拟,得到浸润线数值解曲线;在 Matlab 上进行理论曲线绘制,得到浸润线解析解曲线。将二者进行对比,选取浸润线的最小埋深处进行误差分析,由此来验证解析解。

误差分析计算式为

$$\epsilon = h_a - h_n \quad (21)$$

$$\epsilon_r = \frac{h_a - h_n}{h_a} \times 100\% \quad (22)$$

式中, ϵ 为解析解与数值解的绝对误差; h_a 为浸润线最小埋深的解析解; h_n 为浸润线最小埋深的数值解; ϵ_r 为解析解与数值解的相对误差。

3.3 结果分析

3.3.1 底坡 0.05 工况分析

底坡 0.05 工况尾矿库浸润线修正后解析解、文献[15]解析解与数值解对比结果如图 3 所示。

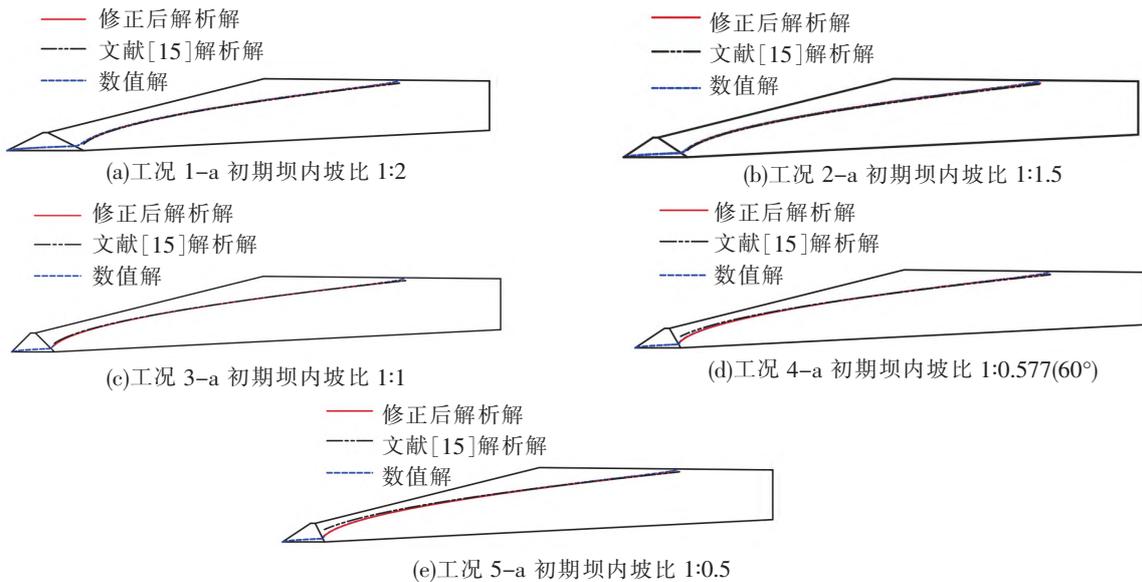


图 3 底坡 0.05 工况浸润线修正后解析解、文献[15]解析解与数值解对比

从图 3 可以看出,修正后尾矿库浸润线的解析解与文献[15]中的解析解相比,主要差别发生在堆积坝下游附近的位置。为进一步体现两者的差异,求解了 2 种解析解确定的浸润线最小埋深的误差。

底坡 0.05 工况模型浸润线修正后解析解、文献[15]解析解及数值解误差分析如表 3 所示,其中, h_a 为修正后解析解, h_b 为文献[15]解析解, h_n 为数值解, ϵ_r 为修正后解析解与数值解的相对误差, ϵ_r' 为文献[15]解析解与数值解的相对误差。

表 3 底坡 0.05 工况误差分析

工况	h_a/m	h_b/m	h_n/m	$\epsilon_r/\%$	$\epsilon_r'/\%$
1-a	14.673 7	14.847 2	14.158 8	3.51	4.64
2-a	12.642 6	12.857 4	12.354 0	2.28	3.92
3-a	10.612 9	10.038 1	10.415 9	1.86	-3.76
4-a	8.885 2	7.593 2	8.687 3	2.23	-14.41
5-a	8.431 6	6.501 9	8.316 2	1.37	-27.90

分析表 3 中浸润线修正后解析解、文献[15]解析解与数值解相对误差结果,在尾矿库底坡 0.05 的工况组中,浸润线修正后解析解和数值解相对误差最大值未超过 4%,修正后解析解与数值解误差较小,吻合较好。初期坝内坡比较小的工况,修正后的解析解相较文献[15]解析解精度有所提升。当初期坝内坡比较大时,文献[15]解析解出现较大误差,此时修正后解析解误差较小,表明了修正后解析解的正确性,且适用范围更广。

3.3.2 底坡 0.1 工况分析

底坡 0.1 工况尾矿库浸润线修正后解析解、文献[15]解析解与数值解对比结果如图 4 所示。

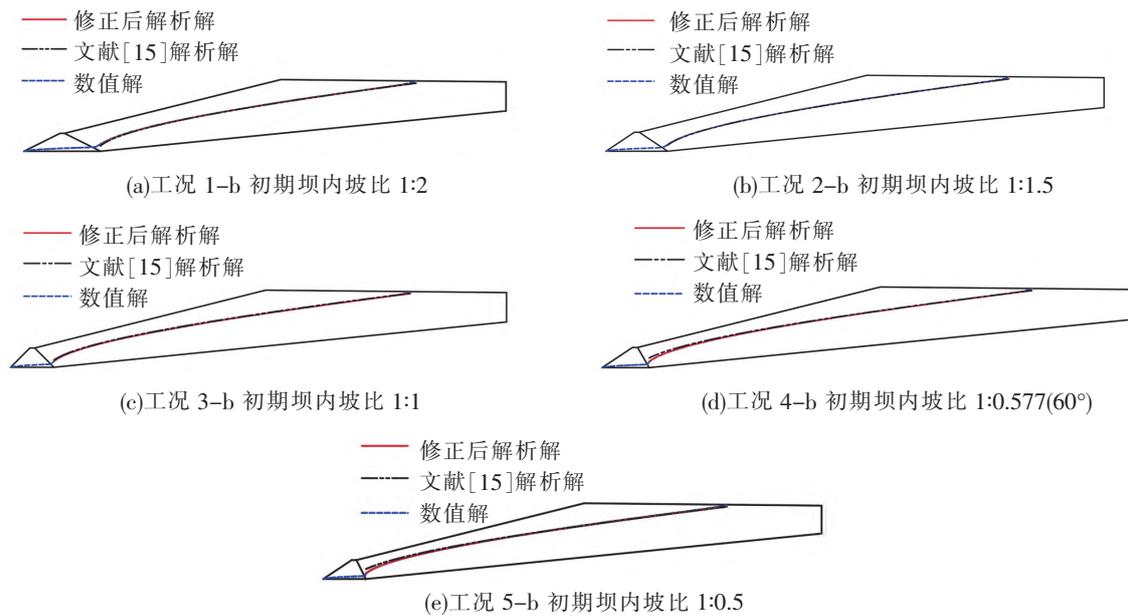


图 4 底坡 0.1 工况浸润线修正后解析解、文献[15]解析解与数值解对比

从图 4 可以看出,修正后解析解与文献[15]解析解的差别同样体现在堆积坝下游区域,计算最小埋深处的误差。底坡 0.1 工况模型浸润线修正后解析解、文献[15]解析解与数值解误差分析如表 4 所示。

表 4 底坡 0.1 工况误差分析

工况	h_a/m	h_b/m	h_n/m	$\epsilon_r/\%$	$\epsilon_r'/\%$
1-b	16.574 2	16.827 6	16.266 8	1.81	3.33
2-b	14.663 5	14.818 7	14.480 1	1.25	2.30
3-b	12.630 5	12.029 5	12.511 4	0.94	-4.01
4-b	10.975 8	9.890 3	10.950 6	0.23	-10.72
5-b	10.635 9	8.679 3	10.586 4	0.04	-21.97

分析表 4 相对误差结果,在尾矿库底坡 0.1 的工况组中,浸润线修正后解析解和数值解相对误差最大值未超过 2%,修正后解析解与数值解误差较小,吻合较好。对于初期坝内坡比较小的工况,修正后的解析解相较文献[15]解析解误差更小。而初期坝内坡比为 1:0.577(60°)的工况 4-b,文献[15]解析解误差较大,超过了 10%,初期坝内坡比为 1:0.5 的工况 5-b,误差超过了 20%,而修正后的解析解误差较小接近为 0,表明修正后的尾矿库浸润线解析解可以适用于初期坝内坡比较大的工况。与底坡 0.05 工况的规律一致,进一步表明了修正后解析解的正确性。

4 结论

尾矿库的安全稳定与浸润线分布密切相关,本文开展了尾矿库的渗流场浸润线研究,建立尾矿库数值模型,对传统湿式尾矿库浸润线解析解进行了修正,得到更为精确的尾矿库浸润线解析解,并利用有限元软件进行数值模拟验证。得到如下结论:

(1) 对实际尾矿库底坡进行简化,建立了二维尾矿库渗流模型,采用达西渗透定律与能量方程推导了湿式尾矿库浸润线的微分方程。

(2) 简化渗流求解过程,延长上下游处浸润线并添加附加渗径。在上游处修正米哈伊洛夫经验公式,确定了上游水位边界条件;在下游处忽略初期坝渗透系数的影响,结合杜布依方程并引入柯钦娜理论式与法尔科维奇理论式,建立了下游水位边界方程。结合修正后的上下游边界方程与湿式尾矿库浸润线微分方程,推导出修正后的湿式尾矿库浸润线解析解。

(3) 利用 GeoStudio 有限元软件建立尾矿库数值模型,将尾矿库浸润线修正后解析解、文献[15]解析

解与数值解进行对比。结果表明:①修正后尾矿库浸润线的解析解与文献[15]中的解析解相比,主要差别发生在堆积坝下游区域;②初期坝内坡比较小工况,修正后解析解与数值解吻合较好,修正后解析解相较文献[15]解析解的相对误差更小,最大相对误差值未超过 4%,精度更高;初期坝内坡比较大的工况,文献[15]解析解误差较大,最小相对误差值超过 10%,修正后解析解误差较小,最大相对误差值未超过 3%,表明修正后解析解适用于初期坝内坡比较大工况。

参 考 文 献

- [1]陈聪聪,赵怡晴,姜琳婧.尾矿库溃坝研究现状综述[J].矿业研究与开发,2019,39(6):103-108.
- [2]DU Z, GE L, NG A H M, et al. Risk assessment for tailings dams in Brumadinho of Brazil using InSAR time series approach[J/OL]. Science of The Total Environment, 2020, 717: 137125 [2024-01-02]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137125>.
- [3]高亚伟,孔祥云,唐勇俊.不同因素对尾矿库浸润线影响的数值模拟研究[J].中国锰业,2017,35(3):154-157.
- [4]刘宁,罗敏杰.尾矿堆积坝浸润线影响因素及降低浸润线措施[J].现代矿业,2015,31(11):100-101.
- [5]张平,王欢.温庄尾矿库尾矿坝渗流场的数值模拟[J].有色冶金设计与研究,2018,39(6):12-16.
- [6]王飞跃,杨铠腾,徐志胜,等.基于浸润线矩阵的尾矿坝稳定性分析[J].中国安全生产科学技术,2011,7(11):20-23.
- [7]尹光志,魏作安,万玲.龙都尾矿库地下渗流场的数值模拟分析[J].岩土力学,2003,24(增刊2):25-28.
- [8]李亮,褚雪松.浸润线深度对尾矿坝稳定性分析的影响研究[J].中国安全生产科学技术,2011,7(11):20-23.
- [9]王皓,周璐,林雪松.尾矿坝渗流场模型简化与浸润线计算[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2016,35(1):27-31.
- [10]赵怡晴,汪杰,钟士照,等.降雨条件下尾矿库浸润线变化及坝体变形分析[J].矿业研究与开发,2023,43(2):157-162.
- [11]黄亚,李勇刚,陈晓方.基于 DE-Kalman 滤波的尾矿库浸润线监测信息处理[J].控制工程,2016,23(9):1319-1324.
- [12]XU Tongle, WANG Yingbo, CHEN Kang. Tailings saturation line prediction based on genetic algorithm and BP neural network[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2016, 30(4): 1947-1955.
- [13]阮顺领,韩思淼,张宁宁,等.基于 CNN-aGRU 融合模型的尾矿坝浸润线预测方法[J].中国安全科学学报,2023,33(增刊1):119-127.
- [14]马斌,张晨晨,赵怡晴,等.基于 EEMD-LSTM 模型的尾矿库风险预测模型研究[J].中国安全生产科学技术,2022,18(12):116-121.
- [15]戴健非,杨鹏,诸利一,等.集成 PCA 和 LSTM 神经网络的浸润线预测方法[J].中国安全科学学报,2020,30(3):94-101.
- [16]YANG J, QU J, MI Q, et al. A CNN-LSTM model for tailings dam risk prediction[J]. IEEE Access, 2020, 8: 206491-206502.
- [17]李强,高松,牛红凯,等.尾矿库浸润线及适用性分析[J].岩土力学,2020,41(11):3714-3721.
- [18]毛昶熙.渗流计算分析与控制[M].北京:中国水利水电出版社,2003.
- [19]吴世余,宋新江.不透水地基上设有排水棱体堤坝渗流计算的理理解[J].岩土工程学报,2012,34(1):102-109.
- [20]波卢巴里诺娃-可钦娜 П Я.地下水运动原理[M].肖南森,译.北京:地质出版社,1957.

A Study on the Correction of Analytical Solution for Wetted Tailings Reservoir Saturation Line

HU Kaiwen^{1,2}, LIU Jiahang^{1,2}, LI Qiang^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The saturation line is one of the main factors affecting the stability of tailings ponds, and accurate prediction of the saturation line position is of great significance for preventing the instability of

tailings points. In response to the analytical solutions proposed in existing literature for wet tailings ponds, the downstream boundary condition equations were modified using Kochina's theory and Falkovich's theory. Combined with the modified upstream and downstream boundary conditions, the analytical solution for the revised saturation line of the tailings pond was obtained. A working condition model was established using finite element software with bottom slopes of 0.05 and 0.1, as well as initial slope ratios of 1 : 2, 1 : 1.5, 1 : 1, 1 : 0.577 (60°), and 1 : 0.5. The analytical solution proposed in the paper was compared with numerical and literature analytical solutions, and the results showed that the proposed analytical solution had higher accuracy and wider applicability.

Key words: tailings pond; saturation line; revised analytical solution; seepage field; numerical simulation

(上接第 55 页)

Application of Convergence-confinement Method in Squeezing Surrounding Rock Tunnel

LIU Zhichun^{1,2,3}, LIU Pingyang³, TAO Zhengwei³, SUN Minglei^{1,2,3}, GUO Xiaolong^{1,2,3}

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Road and Railway Engineering Safety Assurance, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Due to the particularity of surrounding rock properties and stress environment of squeezing surrounding rock tunnel, the characteristic curve of surrounding rock is obviously different from that of conventional tunnel. In order to study the interaction relationship between surrounding rock and support in squeezing surrounding rock tunnel, the characteristic curve of surrounding rock was modified by considering the support effect. The influence of different deformation grades on the modified characteristic curve of surrounding rock was studied, and the primary support of double-track railway tunnel with squeezing surrounding rock was optimized. The results show that the arch foot and the wall foot are safe control positions due to the influence of stress concentration under the condition of a rough tunnel. With the increase of deformation grade and lateral pressure coefficient, the support characteristic curve and the modified surrounding rock characteristic curve no longer intersect. The deformation of grade I and grade II can meet the safety requirements by using single-layer support. The anchors only need to be arranged in the arch and side wall positions, and the deformation anchors of grade II and above need to be arranged in the whole ring. Grade IV deformation needs to consider measures such as improving the shape of the tunnel and advanced reinforcement while adopting double-layer support.

Key words: squeezing surrounding rock tunnel; deformation grade; stress release method; modified surrounding rock characteristic curve; supporting characteristic curve