

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2015.01.009

## 基于简化边界的尾矿坝浸润线解析解

林雪松<sup>1</sup>, 陈殿强<sup>2</sup>, 何 峰<sup>3</sup>

(1. 辽宁工程技术大学理学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁有色勘察研究院, 辽宁 沈阳 110013;  
3. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 浸润线的计算是尾矿坝安全状况评估的重要环节, 对尾矿库安全起到至关重要的作用。为了能够用解析的方法得出浸润线, 首先略掉无关紧要的部分, 将尾矿坝的渗流分析区域简化为一个矩形, 然后在矩形区域中选定两种符合工程实际的边界条件, 最后求解渗流微分方程即求出这两种边界条件下的浸润线。求解中涉及到的偏微分方程无论是齐次还是非齐次的, 都通过傅里叶级数法得到收敛的无穷级数解。该方法的突出特点就是得到的最终结果是解析解。实际应用时通过与实测浸润线数据拟合确定浸润线求解公式中的常数。通过对某尾矿坝浸润线的计算发现前面得到的公式可以用于实际浸润线的计算。

**关键词:** 尾矿坝; 浸润线; 解析法; 傅里叶级数

中图分类号: 0359

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2015)01-0056-06

## Analytical solution of tailing dam seepage line on the basis of simplified boundary

LIN Xuesong<sup>1</sup>, CHEN Dianqiang<sup>2</sup>, HE Feng<sup>3</sup>

(1. College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;  
2. Liaoning Nonferrous Exploration and Research Institute, Shenyang, Liaoning 110013, China;  
3. Institute of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** Computation of seepage line is one of the most important step of safe condition evaluation of tailings dam, so it is very important to safe of tailings dam. In order to get seepage line through analytical method, this article first ignore unimportant part and simplify the zone as an rectangle, then this article chose two kinds of boundary condition which can match practical situation of engineering in the rectangular zone, at last we can get seepage line under these two kinds of boundary condition by resolving seepage differential equation. We can get Infinite series solution which must be convergent by method of fourier series regardless of homogeneous or inhomogeneous differential equation we may meet. The main character of this method is that it's final solution is analytical. In practice we can get constants of equation which can give seepage line by curve fitting of observed datum. After solving of seepage line of one tailing dam we find the equation we can be used to get seepage line of tailings dam.

**Keywords:** tailings dam; seepage line; analytical method; fourier series

收稿日期: 2013-10-20; 修订日期: 2013-11-22

基金项目: 国家青年科学基金(11202091)

第一作者: 林雪松(1979-), 男, 满族, 辽宁丹东人, 在读博士研究生, 主要研究方向为尾矿坝安全中的力学问题。E-mail: lxs488@qq.com

## 0 引言

尾矿坝是一种人工构造的高势能工业建筑物,是矿山生产的重大危险源,它的运营好坏,不仅影响到一个矿山企业的经济效益,而且与库区下游居民的生命财产及周边环境息息相关<sup>[1]</sup>。浸润线是影响尾矿坝稳定的一个最重要因素<sup>[2-3]</sup>,因此尾矿坝的浸润线也被称为坝体的生命线。为了能准确评估在不同浸润线下坝体的安全性,工程中需要先算出浸润线。严格确定尾矿坝的浸润线需要在复杂边界条件下求解渗流偏微分方程,这一般是很难实现的。因此实际应用中人们往往使用数值方法来解决渗流问题,比如李晓等基于有限差分法对库水位涨落与降雨联合作用的多种工况下滑坡中的地下水位进行计算<sup>[4]</sup>;刘新喜等模拟了库水位波动情况下浸润线的变化情况<sup>[5]</sup>,数值方法是经过很多年发展并且积累了丰富成功经验的方法,对这种方法的正确性我们从不怀疑,但是在注重数值方法的同时,也应该继续尝试解析的方法。国外Kacimov、Obnosov 和 Warrick,等<sup>[6-9]</sup>曾经对浸润线的解析解进行过研究,国内郑颖人,等<sup>[10]</sup>得到了库水位下降时坡体内浸润线的简化计算公式;冯文凯,等<sup>[11]</sup>求得了降雨及库水升降作用下土质岸坡坡体内浸润线预测的简化公式;吴琼,等<sup>[12]</sup>采用稳定渗流情况下的浸润线作为非稳定渗流的初始值,推导出库水位升降联合降雨作用下浸润线的近似解析解。以上的解析法求解过程中均是通过对方程进行简化,针对尾矿坝这样的特殊边坡,我们可以尝试将分析区域进行简化,即在复杂边界条件下分离出简单边界,则可以求得渗流方程的解析解,进而得出坝体浸润线。

## 1 简化模型的建立

若将尾矿坝看做各向同性的均匀介质,在二维情况下,其渗流偏微分方程可以写成 $\Delta H = 0$ ,式中 $H = H(x, y)$ 代表水头。该方程需要和一定的求解区域及边界条件结合到一起才能得到有实际意义的解。如图1所示,折线 ABCDEFGHIA 代表了典型的尾矿坝研究区域,为了使问题得到简化,在已经建立好的区域上重新建立起新的分析区域 AJHI,尝试一下用这个新的矩形区域来代替原来的复杂区域。这样进行区域简化的原因有两个。首先,使浸润线的解析求解成为可能。在目前的偏微分方程理论中,还没有办法在区域 ABCDEFGHIA 内对渗流偏微分方程进行解析求解,但是若将区域简化为矩形就可以求解了,相应的理论和

方法已经很成熟。其次,使边界条件的确立变得很简单。在复杂区域中若想在某个坐标系中把每一条边上的边界条件都给出来,通常都会很麻烦,而简化后的矩形区域只有四条边,给出其边界条件相对要容易的多。

从复杂区域简化到矩形区域,这中间一定会引起计算误差,但是由于浸润线一般都位于模型中较低的部分,比如图1中折线 AKEFG 之下,因此多增加的区域 KEFGJK 对浸润线计算产生的影响会非常有限,所以计算误差对最终的浸润线结果不会有太大的影响,下面通过一个浸润线对比的实例来说明。分别利用复杂区域和简化后的矩形区域在 geo-studio2007 中建立模型,并在两种模型中设定完全相同的渗流参数和边界条件,两种模型得到的浸润线如图2所示,从图中可以明显看出,复杂区域和简单区域计算的浸润线基本重合在一起,所以可以认为这种区域简化引起的误差在一般工程环境下是可以容忍的。

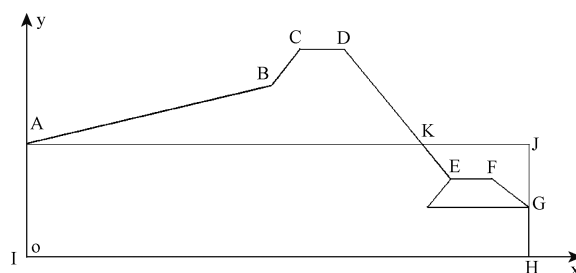


图1 尾矿坝截面简图

Fig. 1 Simple figure of tailing dam cross-section

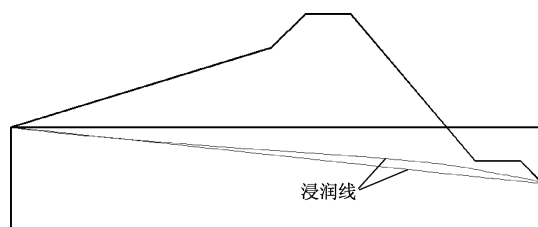


图2 浸润线对比图

Fig. 2 Comparing of seepage lines

分析区域选择好之后,还需要确定符合工程实际的边界条件。接下来将矩形区域各条边处的边界条件分别讨论。如图1所示,首先,对于 AI 边,最实用的是取成第一类边界条件,假设该边界处水头为常数,常数值即为 A 点的高度。这样做一方面是考虑到求解过程的简单性,第一类边界条件一般比第二类边界条件容易求解。另一方面也是对模型进行理想化处理的结果。在理想化处理中假设 AI 边左边有一个无限大水池,该水池水位高度即为 AI 边高度,把尾矿坝的渗流

过程等效成水从该水池中渗向坝体,形成浸润线。另外这样取也是从工程实际的角度考虑,通常我们都是很容易测量出这条边的水头高度的。第二,对于 AJ 边,在考虑降雨入渗、放矿或蒸发情况下,会有水从该条边流入或流出,该条边处选用第二类边界条件比较合适,即假设解得的函数在该处沿法线方向的导数为某一数值,在图中所建立的坐标系中即是水头沿  $y$  方向的导数为某一数值。第三,对于 JH 边,有两种可选的边界条件。第一种是第一类边界条件,即假设已知 JH 边处的水头值。如果该条边处的水头高度是可变的,那么该处的水头值应该可以与 AI 边的水头值建立某种函数关系,但在实际中该处的水头也可以固定不变。第二种是使用第二类边界条件,即假设已知 JH 边处水头函数的导数。该条边处的导数应该是随高度的变化而变化的,如果使用这种边界条件则给出的是水头函数对  $x$  求导的值。第四,对于 IH 边。和 AJ 边一样该条边只能选用第二类边界条件,即假设已知该处的流速。这样的边界条件也说明水可以从该处渗入和渗出尾矿坝。这种边界条件给出的是水头对  $y$  的导数值。

总结以上的讨论可以看出 AI、AJ、IH 三条边只有一种可能,而 JH 边有两种可选的边界条件用以满足不同的求解要求。这样总体看来我们建立的边界条件只有两种,分别可以表示如下。

边界条件一,已知 JH 边水头:

$$\begin{aligned} H(x, y) \big|_{x=0} = h_1 \quad H(x, y) \big|_{x=l} = \alpha \frac{h_1}{l} \\ \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} \big|_{y=0} = \beta \frac{h_1}{l} \quad \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} \big|_{y=h_1} = q \end{aligned}$$

边界条件二,已知 JH 边法向流速:

$$\begin{aligned} H(x, y) \big|_{x=0} = h_1 \quad \frac{\partial H(x, y)}{\partial x} \big|_{x=l} = ae^{-by} \\ \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} \big|_{y=0} = \beta \frac{h_1}{l} \quad \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} \big|_{y=h_1} = q \end{aligned}$$

以上各式中  $l$  是 IH 边的长度,也就是求解区域的上极限  $x$  坐标,  $h_1$  是 AI 边的高度,  $\alpha, \beta, a, b$  都是常数,这里认为 JH 边水头和 IH 边的法向流速与 AI 边水头成正比,与 IH 边长度成反比,这些都是根据以往的工程经验得出的假设。而 JH 边流速应随高度的增加而减小,通过实际的模拟发现,可以用指数衰减来近似描述这种函数关系。下面就这两种边界条件分别对渗流偏微分方程进行求解。另外在求解中为了叙述方便令

$$\alpha \frac{h_1}{l} = h_2, \beta \frac{h_1}{l} = p。$$

## 2 模型的求解

### 2.1 已知 JH 边水头边界条件下的求解

此时的渗流方程和边界条件完整表述如下

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$H(x, y) \big|_{x=0} = h_1 \quad H(x, y) \big|_{x=l} = h_2 \quad (2)$$

$$\frac{\partial H(x, y)}{\partial y} \big|_{y=0} = p \quad \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} \big|_{y=h_1} = q \quad (3)$$

由边界条件(2)的齐次化处理可以得到  $H(x, y) = w(x, y) + v(x, y)$ ,

$$\text{其中 } v(x, y) = \frac{(h_2 - h_1)}{l}x + h_1, w(x, y) \text{ 满足下面}$$

的方程和边界条件

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0 \quad (4)$$

$$w(x, y) \big|_{x=0} = 0 \quad w(x, y) \big|_{x=l} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \big|_{y=0} = p \quad \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \big|_{y=h_1} = q \quad (6)$$

利用分离变数法得到方程 4 的解为

$$w(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} (C_n e^{\frac{n\pi}{l}y} + D_n e^{-\frac{n\pi}{l}y}) \sin \frac{n\pi}{l}x \quad (7)$$

将方程(7)带入边界条件(6)会得到

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\pi}{l} (C_n - D_n) \sin \frac{n\pi}{l}x = p \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\pi}{l} (C_n e^{\frac{n\pi}{l}h_1} - D_n e^{-\frac{n\pi}{l}h_1}) \sin \frac{n\pi}{l}x = q \quad (9)$$

在以上两式中,方程左边都是正弦级数,这就提示我们可以将方程右边也展成正弦级数并使相同项系数相等,即

$$\frac{n\pi}{l} (C_n - D_n) = \frac{2}{l} \int_0^l p \sin \frac{n\pi}{l}x dx \quad (10)$$

$$\frac{n\pi}{l} (C_n e^{\frac{n\pi}{l}h_1} - D_n e^{-\frac{n\pi}{l}h_1}) = \frac{2}{l} \int_0^l q \sin \frac{n\pi}{l}x dx \quad (11)$$

由以上两式可解得  $C_n$  和  $D_n$  最终得到

$$\begin{aligned} H(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2l}{n^2 \pi^2} \left[ \left( \frac{q - pe^{-\frac{n\pi}{l}h_1}}{sh \frac{n\pi}{l}h_1} \right) e^{\frac{n\pi}{l}y} + \left( \frac{q - pe^{\frac{n\pi}{l}h_1}}{sh \frac{n\pi}{l}h_1} \right) e^{-\frac{n\pi}{l}y} \right] \sin \frac{n\pi}{l}x \\ + \frac{(h_2 - h_1)}{l}x + h_1 \quad (n = 1, 3, 5 \dots) \end{aligned} \quad (12)$$

### 2.2 已知 JH 边法向流速边界条件下的求解

此时的渗流方程和边界条件完整表述如下

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} = 0 \quad (13)$$

$$H(x, y) \big|_{x=0} = h_1 \quad \frac{\partial H(x, y)}{\partial x} \big|_{x=l} = ae^{-by} \quad (14)$$

$$\frac{\partial H(x, y)}{\partial y} \big|_{y=0} = p \quad \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} \big|_{y=h_1} = q \quad (15)$$

对边界条件(15)进行齐次化处理可得  $H(x, y) = w(x, y) + v(x, y)$

其中  $v(y) = \frac{q-p}{2h_1}y^2 + py$ ,  $w(x, y)$  满足下列的方程

和边界条件

$$\frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w(x, y)}{\partial y^2} = \frac{p-q}{h_1} \quad (16)$$

$$w(x, y) \big|_{x=0} = \frac{p-q}{2h_1}y^2 - py + h_1 \quad (17a)$$

$$\frac{\partial w(x, y)}{\partial x} \big|_{x=l} = ae^{-by} \quad (17b)$$

$$\frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \big|_{y=0} = 0 \quad \frac{\partial w(x, y)}{\partial y} \big|_{y=h_1} = 0 \quad (18)$$

方程(16)属于非齐次偏微分方程,可假设其解具有级数的形式

$w(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} X_n(x) Y_n(y)$  [13], 由方程 16 的齐次形式和齐次边界条件 18 构成的本征值问题可以得到该级数的基函数为  $\cos \frac{n\pi}{h_1}y$ , 即  $w(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} X_n(x) \cos \frac{n\pi}{h_1}y$ , 将其代入方程(16)可以得到

$$H = \frac{p-q}{2h_1}x^2 + \left[ \frac{a}{h_1b}(1-e^{-bh_1}) - \frac{p-q}{h_1} \right]x + \left(1 - \frac{q}{6} - \frac{p}{3}\right)h_1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{2h_1}{n^2\pi^2}(p-q\cos n\pi)e^{-\frac{n\pi}{h_1}x} + \frac{2abh_1^2(1-e^{-bh_1}\cos n\pi)}{(n^2\pi^2+b^2h_1^2)n\pi} \frac{e^{\frac{n\pi}{h_1}l}}{e^{\frac{n\pi}{h_1}l} + e^{-\frac{n\pi}{h_1}l}} e^{-\frac{n\pi}{h_1}x} \right] \cos \frac{n\pi}{h_1}y + \frac{q-p}{2h_1}y^2 + py$$

### 3 解的实际应用

有了前面形成的求解思路,即可计算出尾矿坝的浸润线,下面从其中选择第一种边界条件用来计算某上游式筑坝的 5 等尾矿库的主坝浸润线。该主坝始建于 1957 年,设计坝高 29 m,目前坝顶标高为 74.9 m,坝长 280 m,坝顶宽 8 m,坝高 27.2 m。主坝由两部分组成,标高 67.0 m 以下是 1957 年筑成。坝顶宽 4.0 m,在标高 59.0 m 处设一马道,马道宽度约 6.0 m,坝外坡坡度平均 1:3.0。标高 67.0 m 以上到目前标高 74.9 m 是在尾矿沉积滩上后加高的,坝顶宽约 7.0 m,坝外坡坡度为 1:2.6。初期坝为土石坝,坝底标高为 47.7 m,坝外坡平

$$\sum_{n=0}^{\infty} [X_n'' - (\frac{n\pi}{h_1})^2 X_n] \cos \frac{n\pi}{h_1}y = \frac{p-q}{h_1} \quad (19)$$

等式(19)左边是傅里叶余弦级数,这就提示我们将右边也展成余弦级数,并比较两侧对应项的系数可得

$$X_n'' = \frac{p-q}{h_1}, X_n'' - (\frac{n\pi}{h_1})^2 X_n = 0, \text{这是两个常微分}$$

方程,它们的解分别是

$$X_0 = \frac{p-q}{2h_1}x^2 + C_1x + C_2 \quad (20a)$$

$$X_n = A_n e^{\frac{n\pi}{h_1}x} + B_n e^{-\frac{n\pi}{h_1}x} \quad (20b)$$

再将  $w(x, y)$  的表达式代入边界条件 17 可得

$$\sum_{n=0}^{\infty} X_n(0) \cos \frac{n\pi}{h_1}y = \frac{p-q}{2h_1}y^2 - py + h_1 \quad (21)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} X_n'(l) \cos \frac{n\pi}{h_1}y = ae^{-by} \quad (22)$$

依然利用傅里叶级数法可以得到

$$X_0(0) = (1 - \frac{q}{6} - \frac{p}{3})h_1 \quad X_0'(l) = \frac{a}{h_1b}(1 - e^{-bh_1}) \quad (24)$$

$$X_n(0) = \frac{2h_1}{n^2\pi^2}(p-q\cos n\pi)X_n'(l) = \frac{2abh_1^2(1-e^{-bh_1}\cos n\pi)}{n^2\pi^2 + b^2h_1^2} \quad (25)$$

将(24)式(25)式分别代入(20)式中解得所有常数后得到

$$\frac{2h_1}{n^2\pi^2}(p-q\cos n\pi)e^{-\frac{n\pi}{h_1}x} + \frac{2abh_1^2(1-e^{-bh_1}\cos n\pi)}{(n^2\pi^2+b^2h_1^2)n\pi} \frac{e^{\frac{n\pi}{h_1}l}}{e^{\frac{n\pi}{h_1}l} + e^{-\frac{n\pi}{h_1}l}} e^{-\frac{n\pi}{h_1}x}$$

均坡度为 1:3.3。该尾矿坝的截面图如图 3 所示,通过勘察资料可将截面分成 4 个组成部分,分别是尾粉砂、碎石、素填土、砂岩,使用的简化分析区域即为图中的矩形 ABCO。在简化后的矩形区域中并没有在复杂区域的基础上去掉很多,相反却增加了很大一部分分析内容。图中的三条竖线即标记出浸润线监测点的位置。本例中采用前述的第一种边界条件,对于 AB 边的 q,其物理意义可以理解为竖直方向上的渗透速度与渗透系数之间的比值,通过渗透试验结果来确定,对于 AO 边将其边长作为该条边的水头值,只要知道 AO 边的边界条件,剩下两条边处的边界条件就可以表示出来,但是这会涉及到两个未知参数  $\alpha$  和  $\beta$ ,实际应用中通过曲线

拟合来获得。曲线拟合的结果见图 4,在图 4 中使用了与图 3 完全相同的坐标系,首先依据各浸润线监测点得到的浸润线高度和监测点水平位置构造坐标点并在图中将每一坐标点描出,再将这些点联接起来即得到测量浸润线。然后以测量浸润线为目标,通过不断改变参数  $\alpha$  和  $\beta$  的值来调整计算浸润线的位置,直到计算浸润线与测量浸润线拟合到最佳状态为止。在图 4 的情况下得到的待定参数值为  $\alpha = 96.39, \beta = 0.18$ , 参数值确定之后,就可以用这个计算系统来计算新的浸润线,某一库水位情况下得到的计算浸润线与实测浸润线比较如图 5 所示,计算浸润线比实测浸润线要稍微高一些,但总体来说符合的比较好,因此可以用这个系统来预测新的库水位下的浸润线。

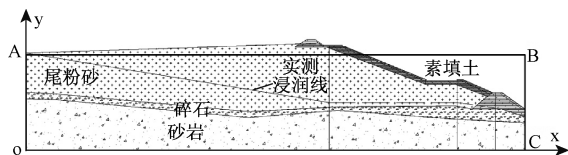


图 3 尾矿坝截面图

Fig. 3 Figure of tailing dam cross-section

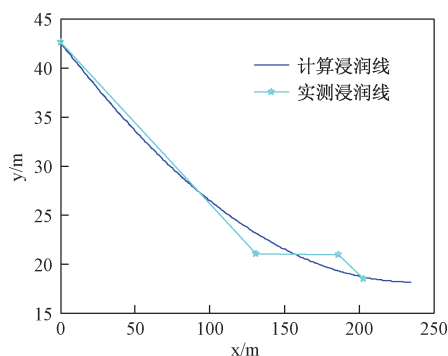


图 4 参数拟合的计算浸润线与实测浸润线的对比

Fig. 4 Parameter fitting's comparing of computational and practical seepage line

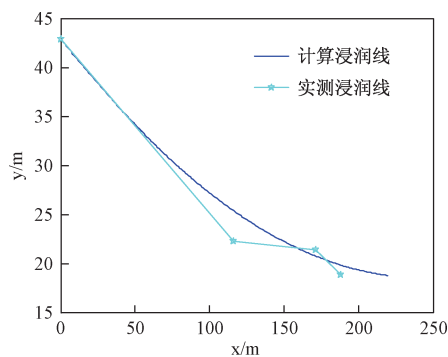


图 5 计算浸润线与实测浸润线的对比

Fig. 5 Comparing of Computational and Practical Seepage Line

这里需要强调的是在计算新浸润线时,  $h_1$  和  $l$  的数值都要变化,即整个简化的矩形模型的长和宽都要变化,其他各参量数值不要改变。本例中通过 Matlab7.7 编写程序来模拟式(12)和进行曲线拟合计算。

## 4 结论

(1)复杂边界渗流问题也可以用解析法来解决,但是求解时需要用简单边界来替代复杂边界,对于尾矿坝这样的复杂边界,简化后主要可以得到两种符合实际的边界条件。

(2)依据边界求解渗流偏微分方程时首先需要对其相应的边界条件进行齐次化,然后可以尝试用分离变量法、傅里叶级数法来求解方程。

(3)方程的解中都会涉及到未知参数,在工程中可以通过拟合法来确定这些参数的数值,同时对这些参数意义的研究也是深入探讨的方向。

## 参考文献:

- [1] 梁冰, 刘泳蔚, 金佳旭. 酸碱溶液作用下尾矿砂压缩特性的试验分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(2): 107-110.  
LIANG Bing, LIU Yongwei, JIN Jiaxu. Under the action of acid and alkali solution of tailing deposit soil compression characteristics of the experimental research [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(2): 107-110.
- [2] 祝玉学, 戚国庆. 尾矿库工程分析与管理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.  
ZHU Yuxue, QI Guoqing. Analysis and management of tailing spond engineering [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.
- [3] 胡明鉴, 郭爱国, 陈守义. 某上游法尾矿坝抗滑稳定性分析的几点思考[J]. 岩土力学, 2004, 25(5): 769-773.  
HU Mingjian, GUO Aiguo, CHEN Shouyi. Reflections on anti-slide stability analysis of a gangue dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(5): 769-773.
- [4] 李晓, 张年学, 廖秋林, 等. 库水位涨落与降雨联合作用下滑坡地下水动力场分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3714-3720.  
LI Xiao, ZHANG Xuenian, LIAO Qiulin, et al. Analysis on hydrodynamic field influenced by combination of rainfall and reservoir level fluctuation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2004, 23(21): 3714–3720.
- [5] 刘新喜, 夏元友, 练操, 等. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1427–1431.
- LIU Xinxi, XIA Yuanyou, LIAN Cao, et al. Research on method of landslide stability valuation during sudden drawdown of reservoir level[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1427–1431.
- [6] KACIMOV A R. Analytical solutions in a hydraulic model of seepage with sharp interfaces[J]. Journal of Hydrology, 2002, 258: 179–186.
- [7] KACIMOV A R, OBNOSOV Y V, PERRET J. Phreatic surface flow from a near-reservoir saturated tongue[J]. Journal of Hydrology, 2004, 296: 271–281.
- [8] KACIMOV A R. Analytic Element solutions for seepage towards topographic depressions[J]. Journal of Hydrology, 2006, 318: 262–275.
- [9] W WARRICK A, WIERENGA P J, PAN L. Downward water flow through sloping layers in the vadose zone: analytical solutions for diversions[J]. Journal of Hydrology, 1997, 192: 321–337.
- [10] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3203–3210.
- ZHENG Yingren, SHI Weimin, KONG Weixue. Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3203–3210.
- [11] 冯文凯, 石豫川, 柴贺军, 等. 降雨及库水升降作用下地下水浸润线简化求解[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2006, 33(1): 90–94.
- FENG Wenkai, SHI Yuchuan, CHAI Hejun, et al. The simplified solution of phreatic saturation line under the actions of rainfall and reservoir water level fluctuation[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2006, 33(1): 90–94.
- [12] 吴琼, 唐辉明, 王亮清, 等. 库水位升降联合降雨作用下库岸边坡中的浸润线研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3025–3031.
- WU Qiong, TANG Huiming, WANG Liangqing, et al. Analytic solutions for phreatic line in reservoir slope with inclined impervious bed under rainfall and reservoir water level fluctuation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3025–3031.
- [13] 梁昆森. 数学物理方法(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- LIANG Kunmiao. Method of mathematical physics (the 3<sup>rd</sup> edition) [M]. Beijing: Higher Education Press, 1998.

## 《中国地质灾害与防治学报》编辑部网络采编办公系统试运行通知

各位作者:

您好! 为提高稿件处理和办公效率,《中国地质灾害与防治学报》编辑部已从2013年3月开始启用网络采编办公系统。

作者投稿采用新的网络平台(<http://zgdzzhyfz.paperopen.com/>), 不再使用原电子邮件投稿系统, 特此公告, 望作者们予以支持与合作。

在使用网络系统中您有任何疑问、意见和建议, 请您电话010-62170025或者发邮件到 [nitx@mail.cigem.gov.cn](mailto:nitx@mail.cigem.gov.cn)。

注意: 投稿作者请详细阅读首页导航栏——投稿须知!

期刊编辑部