

# 均质土坝渗流量计算新方法的研究与应用

徐建成, 韩 玮

(江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000)

**摘要:** 试验设置了3种不同的大坝下游坡比、上游坡比、水平趾排水沟长度、自由距高度、坝顶宽度及大坝高度。每次运行都确定了渗流量。结果表明, 渗流量随上游坡度、下游坡度、上游水库水深和水平趾排水沟长度的增加而增加, 随坝顶宽度和自由距高度的增加而减少。利用 SEEP/W 的结果和尺寸分析理论, 开发了一种新的简便可靠的经验方程, 用于计算带水平趾排水沟的均质土坝的渗流排水量。采用人工神经网络(ANN)法对结果进行分析, 表明采用水平趾排水沟的长度是对渗流流量影响较大的几何变量, 而土坝的上游坡度影响较小。

**关键词:** 均质土坝; 渗流量; 人工神经网络; SEEP/W

中图分类号: TV641.2+2

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2025)02-0018-0005

## Research and application of a new method for calculating seepage flow in homogeneous earth dams

XU Jiancheng, HAN Wei

(Jiangsu Province Engineering Investigation and Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225000, China)

**Abstract:** The experiment set three different downstream slope ratios, upstream slope ratios, horizontal drainage ditch length, free distance height, dam crest width, and dam height of the dam. The seepage discharge is determined for each run. The results show that the seepage discharge increases with the increase of upstream slope, downstream slope, upstream reservoir water depth, and horizontal drainage ditch length, and decreases with the increase of dam crest width and free distance height. A new simple and reliable empirical equation was developed using the results of SEEP/W and size analysis theory to calculate the seepage discharge of homogeneous soil dams with horizontal drainage ditches. The analysis of the results by artificial neural network (ANN) shows that the length of the horizontal drainage ditch is a geometric variable that has a significant impact on the seepage flow rate, while the upstream slope of the earth dam has a smaller impact.

**Key words:** homogeneous earth dam; seepage discharge; artificial neural networks; SEEP/W

均质大坝内过剩的孔隙水压力积累和渗流一直是导致大坝失稳或溃坝的主要原因<sup>[1-2]</sup>。必须控制堤坝内部和下面的渗流, 以防止出现隐蔽的内部侵蚀和细粒物质迁移, 或外部侵蚀和坍塌<sup>[3]</sup>。土坝渗流是水从上游面向下游面的持续运动。渗流水的顶部渗流线被称为潜水面。为了在不透水的地

基上筑起足够的堤坝, 并消除堤坝下游区域的渗流问题, 应通过提供水平趾排水沟将潜水面保持在坝内<sup>[4]</sup>。通过考虑穿过多孔介质的流量, 可以估算出土坝和土坝下游的渗水量以及渗水面的位置。目前, 除非边界条件非常简单和特殊, 控制渗水的拉普拉斯方程无法通过解析求解, 因此, 研究人员

收稿日期: 2024-10-09

作者简介: 徐建成(1990—), 男, 工程师, 本科, 主要从事水利工程监理工作。E-mail: 550744752@qq.com

采用了经验法、图形法、流网法和数值法等来精确或近似地求解各种渗流情况下的拉普拉斯方程,以确定潜水面坐标,并估算通过带有水平趾排水口的均质土坝的渗水量<sup>[5-6]</sup>。对于多孔介质中的水流,实验上采用了不同的模型进行模拟。这些模型能很好地反映渗流情况,并能在水头、设计几何形状和其他假设条件变化时,对流动系统的影响进行物理评估<sup>[7]</sup>。

为了建立一个简单的经验方程来评估水平趾排水均质土坝的渗流量。本文采用SEEP/W程序,并借助了量纲分析方法和统计软件SPSS-19。此外,本研究还使用了人工神经网络(ANN)模型,来评估土坝几何形状的每个输入变量对土坝的渗流量的影响。

## 1 试验方法

### 1.1 SEEP/W 程序

SEEP/W(Geo-Studio 的子程序)是一款有限元软件产品,用于分析土壤和岩石等多孔材料中的地下水渗流和过刺孔隙水压力消散问题。该程序可以进行从简单的饱和稳态问题到复杂的饱和和非饱和和时间相关问题的分析,如可用于岩土、土木、水文地质和采矿工程项目的分析和设计。SEEP/W 程序可广泛应用于不同渗流问题的研究。

### 1.2 量纲分析

量纲分析是一种普遍有效的方法,可以精确、清晰地识别物理量之间关系的信息结构。它的出发点是,在定量自然科学中,描述量是有量纲的,可以相应地分为基本量和派生量。

本研究采用量纲分析方法,预测确定水平趾排水均质土坝渗流量的经验方程。水平趾排水均质土坝总剖面见图1。

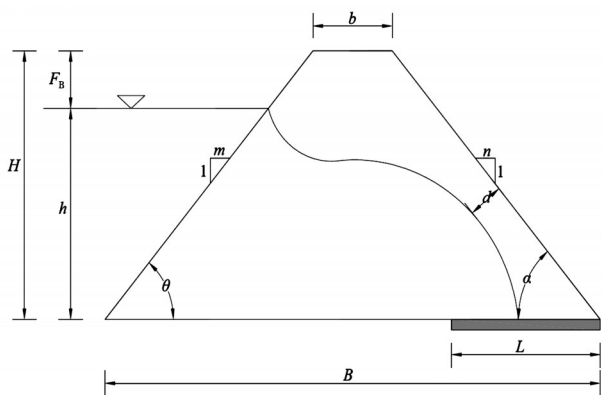


图1 水平排水均质土坝总剖面

$$q = f(\tan\theta, \tan\alpha, K, H, F_B, L, b) \quad (1)$$

式中: $q$ 为渗水量; $\theta$ 为上游面与水平面的角度; $\alpha$ 为下游面与水平面的角度; $K$ 为大坝土壤的渗透率; $H$ 为坝高; $F_B$ 为自由距; $L$ 为水平趾排水沟长度; $b$ 为坝顶宽度。

利用该定理,从式(1)中得到以下无量纲项:

$$\frac{q}{LK} = f\left(\tan\theta, \tan\alpha, \frac{H}{L}, \frac{F_B}{L}, \frac{b}{L}\right) \quad (2)$$

### 1.3 Seep/W 程序运行流程

通过对上述7个影响渗流量的变量分别取3个不同的值,得出SEEP/W程序共进行了2187次测试。这些试验分为3组(A、B和C),D/S坡度分别为1:2、1:2.25和1:2.5。

每组试验采用3种不同的U/S坡度(1:2.5、1:2.75和1:3)、3种不同的坝高(14、15、16 m)、3种不同的坝顶宽度(4、5、6 m)、3种不同的水平趾排水沟长度(10、15、20 m)、3种不同的自由距(1、1.5、2 m)以及3种不同的渗透率(0.0001、0.00001、0.000001 m/s)。

## 2 结果与分析

### 2.1 上游坡度的影响

图2显示了一些试验案例中均质土坝的无量纲参数与上游坡度之间的关系。从图2可以看出,如果下游坡度、坝高、自由距高度和渗透率保持不变,在所有情况下,上游坡度从1:3增加到1:2.5,渗水量会略有增加,但不超过1%;在上下游坡度、坝高、自由距和坝顶宽度值相同的情况下,渗流量随水平趾排水沟的增加而增加;在其余变量不变的情况下,随着坝顶宽度的增加,渗流量也会减少。

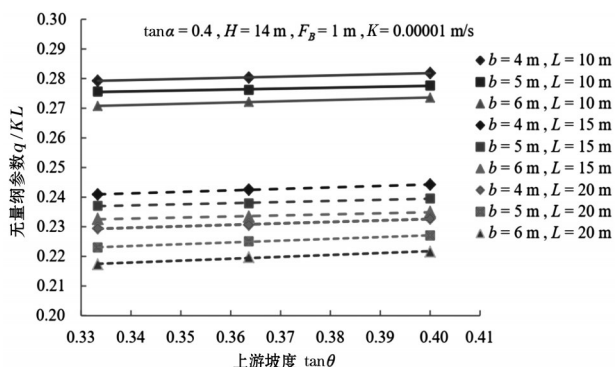


图2 均质土坝的无量纲参数与上游坡度的关系

### 2.2 下游坡度的影响

图3显示了一些测试案例中的无量纲参数与均

质土坝下游坡度之间的关系。从图3可以看出,如果上游坡度、坝高、自由距、水平趾排水沟长度和渗透率为常数,则渗流量会随着下游坡度的增加而增加。其中,在所有测试情况下,随着下游坡度从1:2.5增加到1:2.25,渗流量平均增加30%。当下游坡度从1:2.25增加到1:2时,渗水量增加的百分比相同。此外,图3还显示了与图2相同的趋势,即在其他影响变量不变的情况下,随着水平趾排水沟长度的增加和顶部宽度的减小,渗流量也会增加。

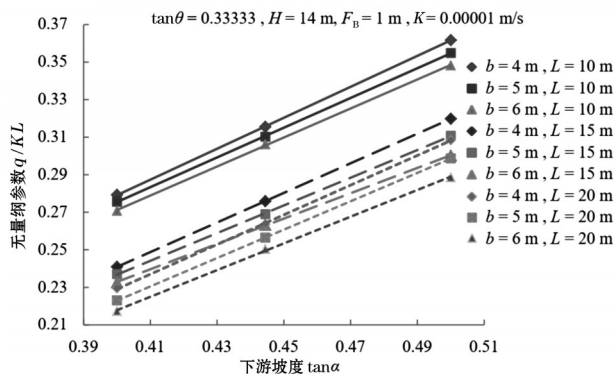


图3 均质土坝的无量纲参数与下游坡度的关系

### 2.3 坝高的影响

无量纲参数与坝高与水平趾排水沟长度之比之间的关系如图4所示。该关系得出结论,在其他影响参数不变的情况下,土坝的渗流随着坝高的增加而增加。值得一提的是,坝高与自由距高度之间的关系(差值)是指上游水库的水面高度。

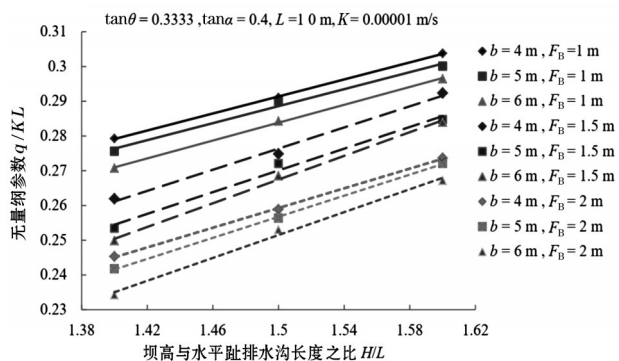


图4 均质土坝的无量纲参数与H/L的关系

### 2.4 自由距高度的影响

自由距是大坝顶面与水库水位之间的垂直距离,因此,在坝高不变的情况下,增加自由距高度正好使上游水深减小,从而导致渗流量减少。图5显示了上述事实,即渗流量随自由距高度的增加而

减少。

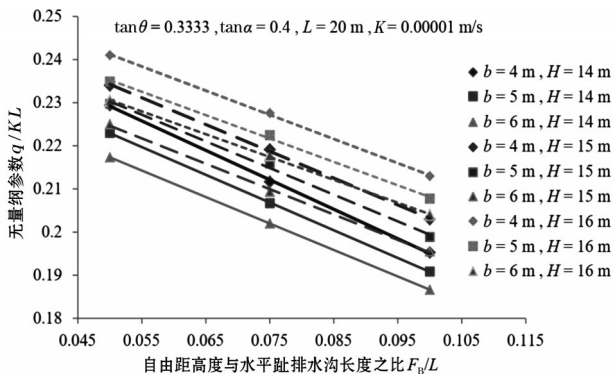


图5 均质土坝的无量纲参数与F\_B/L的关系

### 2.5 顶部宽度的影响

图6显示了无量纲参数与坝顶宽度与排水沟长度之比之间的关系。从图6可见,得出了与图2、图3、图4和图5相同的结果,即在其他参数不变的情况下,随着坝顶宽度的增加,渗流排水量会减少。

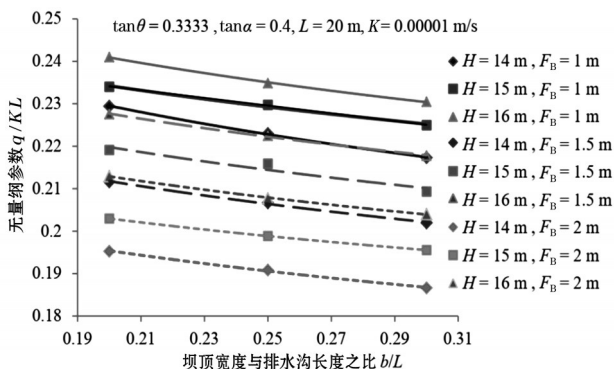


图6 均质土坝的无量纲参数与b/L的关系

### 2.6 统计分析结果与经验方程的验证

为了建立一个经验方程,用于测量带水平趾排水沟的均质土坝渗水量,使用SPSS.19程序对方程(2)无量纲参数的结果数据进行了统计分析。首先,对数据进行降序排列,然后在程序中使用其中约2/3的数据。水平趾排水沟的均质土坝渗水量q的公式见公式(3),决定系数R<sup>2</sup>为0.98:

$$q = \frac{0.45KL^{0.681}(\tan\theta)^{0.101}(\tan\alpha)^{1.167}H^{0.589}}{F_B^{0.176}b^{0.094}} \quad (3)$$

图7显示了通过SEEP/W程序观察到的通过均质土坝的单位排水量的其余1/3结果与使用相同特征和几何边界条件通过公式(3)计算出的结果之间的关系。从图7中可以看出,程序结果与方程结果非常吻合。

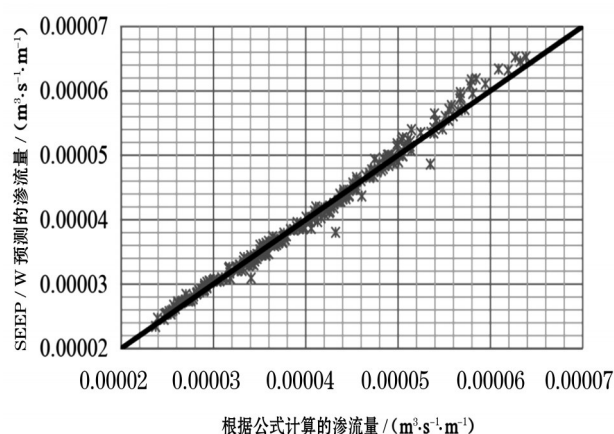


图7 SEEP/W程序观测排水量与经验公式计算渗流量之间的关系

为了验证上述经验方程的正确性和准确性,还将其应用于一些几何尺寸超出了推导该方程所用尺寸范围的均质土坝上,如上文SEEP/W程序运行过程部分所述。如表1所示,根据该方程计算出的渗流排水量结果与SEEP/W程序观测到的结果相比,差异很小。结果表明,导数经验方程具有很好的可信度,而且在应用该方程计算带有水平排水沟的均质土坝的渗流排水量时也非常简单。

## 2.7 人工神经网络(ANN)模型

利用SEEP/W软件在上一节中建立的数据库创建了人工神经网络(ANN)模型,该模型将输出变量与输入变量联系起来,从而控制通过带有水平趾排水沟的均质土坝的渗流量。人工神经网络是由人工神经元组成的分层网络。神经元或节点一般平行排列,形成若干层。接收输入的第一层称为输入层,最后一层为输出层,其余为隐藏层,其数量取决于要解决的问题。输入层是接收输入值的层,输入

层的所有节点构成神经网络的输入。输出层是所有节点向用户外部环境发送输出值的层。隐藏层是网络系统的处理中心。权重通过迭代方式进行调整,以达到预期的输出值。输入层和输出层的节点数是根据训练数据中因变量和自变量的数量固定的,而选择的最佳隐层神经元数较少,网络可能无法正确学习过程。另一方面,如果数量过多,训练时间会很长,而且可能会产生训练数据过度拟合的情况。

为了获得ANN模型,使用了SPSS 19。该软件使用SEEP/W模型分析了约70%的观测数据(729个)。输入变量为几何尺寸,如上游坡度、下游坡度、坝高、自由距高度、水平排水沟长度和顶部宽度,并使用坝体材料的恒定渗透率。输出变量是通过土坝单位宽度的渗流量。ANN模型将输出变量与输入变量联系起来,输入变量控制着通过带有水平趾排水沟的均质土坝的渗流量。ANN模型允许选择隐藏层的数量,以及隐藏层中允许指定的最大和最小单位数。选择自动架构是为了计算出隐藏层的最佳单元数。自动架构选择使用隐藏层和输出层的默认激活函数。此外,还允许指定学习率和动量因子的初始值。

该软件允许选择将活动数据集划分为训练样本、测试样本和保留样本(验证样本)的方法。训练样本包括用于训练神经网络的数据记录,必须将数据集中一定比例的案例分配给训练样本,才能获得模型。测试样本是一组独立的数据记录,用于跟踪训练过程中的错误,以防止过度训练。保留样本是另一组独立的数据记录,用于评估最终的神经网络。保留样本的误差是对模型预测能力的真实估计,因为保留案例并没有用于建立模型。表2显示

表1 SEEP/W渗流观测观测结果及经验方程计算结果

U/S坡度	$\tan \theta$	D/S坡度	$\tan \alpha$	H/m	$F_B/m$	b/m	L/m	K/(m/s)	SEEP/W	方程	差异率/%
1:3.50	0.286	1:2.50	0.400	10	1.5	3.0	12	$1 \times 10^{-5}$	$2.32 \times 10^{-5}$	$2.41 \times 10^{-5}$	+3.9
1:3.50	0.286	1:2.50	0.400	13	2.0	4.0	15	$1 \times 10^{-5}$	$2.90 \times 10^{-5}$	$3.03 \times 10^{-5}$	+4.5
1:3.50	0.286	1:2.50	0.400	17	2.5	6.0	23	$1 \times 10^{-5}$	$4.28 \times 10^{-5}$	$4.39 \times 10^{-5}$	+2.6
1:2.75	0.364	1:2.30	0.435	11	1.3	3.5	14	$1 \times 10^{-5}$	$3.28 \times 10^{-5}$	$3.23 \times 10^{-5}$	-1.5
1:2.75	0.364	1:2.25	0.444	9	1.0	3.0	12	$1 \times 10^{-5}$	$2.90 \times 10^{-5}$	$2.82 \times 10^{-5}$	-2.8
1:2.75	0.364	1:2.40	0.417	13	2.0	4.0	15	$1 \times 10^{-5}$	$3.17 \times 10^{-5}$	$3.26 \times 10^{-5}$	+2.8
1:2.60	0.385	1:2.00	0.500	8	1.0	2.5	10	$1 \times 10^{-5}$	$2.77 \times 10^{-5}$	$2.73 \times 10^{-5}$	-1.6
1:2.60	0.385	1:2.10	0.476	10	1.5	3.0	11	$1 \times 10^{-5}$	$2.81 \times 10^{-5}$	$2.83 \times 10^{-5}$	+2.1
1:2.60	0.385	1:2.25	0.444	12	2.0	4.0	13	$1 \times 10^{-5}$	$2.94 \times 10^{-5}$	$3.05 \times 10^{-5}$	+3.9

了数据子集的划分百分比。

表2 数据子集划分百分比

条目	数据子集	划分百分比/%
训练样本	306	62.2
测试样本	135	27.4
保留样本	51	10.4
有效	492	100
排除	0	
总计	492	

通过对比 ANN 预测的与 SEEP/W 观察的渗流量值,各输入变量的相对重要性如表3所示。可以看出,水平趾排水沟长度的重要性百分比为46.7%,而土坝上游坡度的重要性百分比很小,仅为1.7%。

表3 带水平趾排水沟的均质土坝几何形状的重要性百分比

几何变量	重要性/%	标准化重要性/%
$U/S$ 坡度( $\tan\theta$ )	1.7	3.7
$D/S$ 坡度( $\tan\alpha$ )	26.9	57.6
坝高( $H$ )	7.0	15.1
自由距( $F_R$ )	13.4	28.7
排水沟长度( $L$ )	46.7	100.0
坝顶宽度( $b$ )	4.2	8.7

### 3 结 论

(1)均质土坝的渗流量随着上下游坡度的增加而增加。但是,下游坡度的变化对渗流的影响大于上游坡度。此外,渗流量随上游水深高度和水平趾

排水沟长度的增加而增加。

(2)当土坝的其他几何变量不变时,土坝的渗水量随着坝顶宽度和自由距高度的增加而减少。

(3)ANN方法表明,水平趾排水沟长度是对渗流量影响较大的几何变量,其重要性百分比为46.7%,而土坝上游坡度的影响较小,其重要性百分比为1.7%。下游坡度、坝高、坝顶宽度和自由距的重要性百分比分别为26.9%、7.0%、4.2%和13.4%。

(4)建立了一个简单、直接、可靠的经验方程,用于直接计算通过带有水平趾排水沟的均质土坝的渗流量。为了验证该经验方程的正确性和准确性,将根据该方程计算的不同几何形状土坝的结果与SEEP/W程序的预测结果进行了比较,结果显示两者非常吻合。

#### 参考文献:

- [1] 汪李艳,王静,赵海亮,等.百米级均质土坝坝体排水型式研究[J].西北水电,2024(2):66-71.
- [2] 陈云,王义俊,郑霞忠,等.融合案例挖掘与贝叶斯网络的溃坝事故致因风险分析[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(4):13-21.
- [3] 刘宪东,谷艳昌,王士军,等.均质土坝管涌溃决实验渗流分析[J].中国农村水利水电,2024(6):166-173.
- [4] 刘书军.基于有限元法的均质土坝渗流安全评价分析与应用[J].水利建设与管理,2023,43(8):18-23,17.
- [5] 陈国光,李卓,方艺翔,等.监测资料与探地雷达在均质土坝渗漏分析中的应用[J].人民黄河,2022,44(10):127-132,158.
- [6] 杨青辉.小型均质土石坝渗流分析及变形危害防护[J].四川水利,2022,43(3):34-36.
- [7] 康兴奎.基于有限元法的均质土坝渗流和边坡稳定计算分析[J].甘肃水利水电技术,2022,58(3):53-56.