

# 水利工程中土壤渗透性的试验检测与分析

杲吉祥

新疆兵团水科院(有限公司) 新疆 乌鲁木齐 734000

**摘要:** 本文旨在深入探讨水利工程中土壤渗透性的试验检测方法及其分析过程,为水利工程的设计、施工及安全管理提供理论依据和技术支持。通过介绍土壤渗透性的基本概念、试验检测方法以及数据分析技术,本文系统地阐述了土壤渗透性在水利工程中的重要性及其评估流程,确保内容详细、具体且专业性强。

**关键词:** 水利工程; 土壤渗透性; 试验检测; 数据分析

## 引言

水利工程作为利用水资源的重要基础设施,其安全性和稳定性直接关系到社会经济的可持续发展。土壤渗透性作为影响水利工程性能的关键因素之一,直接关系到工程的防渗、排水及稳定性等问题。因此,准确测定和分析土壤的渗透性对于水利工程的设计、施工及后期维护具有重要意义。

### 1 土壤渗透性的定义与重要性

土壤渗透性是指水流通过土壤孔隙的难易程度,是土壤透水性能的重要表征。它受土壤颗粒大小、形状、排列方式以及孔隙结构等多种因素影响。在水利工程中,土壤渗透性不仅影响地基的沉降速率和地下水的涌水量,还直接关系到工程的防渗效果和稳定性。准确测定土壤渗透性对于评估工程的安全性、制定合理的施工方案及采取必要的防渗措施至关重要。

### 2 土壤渗透性试验检测方法

#### 2.1 实验室测定法

##### 2.1.1 常水头法

常水头法是一种在实验室条件下测定土壤渗透性的经典方法,特别适用于透水性能较好的土壤。该方法的核心在于在试样两端施加一个恒定的水头差,然后测量在单位时间内通过试样的水量,进而计算出土壤的渗透系数。具体操作步骤如下:(1)准备试样:首先,需要选取代表性的土壤样品,并将其制备成符合试验要求的试样。试样的尺寸和形状应根据试验设备和标准进行确定。(2)安装试样:将制备好的试样安装到渗透仪中,并确保试样与渗透仪的壁面紧密接触,以防止水从侧面渗出。(3)施加恒定水头:在试样的两端施加一个恒定的水头差。这通常是通过在试样的一端注入水,并在另一端保持一个固定的水位来实现的。(4)测量水量:在施加恒定水头后,开始测量单位时间内通过试样的水量。这可以通过收集从试样一端流出的水,并测量其体

积来实现。(5)计算渗透系数:根据测量的水量和时间,以及试样的尺寸和水头差,利用达西定律计算出土壤的渗透系数。

##### 2.1.2 变水头法

变水头法是一种专门用于测定透水性能较差的土壤渗透性的实验室方法。与常水头法不同,变水头法在试验过程中会在试样两端施加变化的水头,通过测量不同水头下的渗透速度,进而计算出土壤的渗透系数。以下是变水头法的具体操作步骤和细节:(1)准备试样:选取具有代表性的土壤样品,并按照试验要求制备成合适的试样尺寸和形状。确保试样的均匀性和一致性,以提高试验的准确性。(2)安装试样和测量设备:将制备好的试样安装到渗透仪中,并确保试样与渗透仪壁面紧密接触,防止侧渗。在试样的两端设置测量设备,用于精确测量水头变化和渗透速度。(3)施加变化的水头:在试样的一端逐渐施加变化的水头,可以通过调节水源的高度或使用泵系统来实现。同时,在试样的另一端保持一个相对固定的水位,以便测量渗透速度。(4)测量渗透速度和水头变化:在施加变化的水头后,开始测量不同水头下的渗透速度。这可以通过观察并记录单位时间内通过试样的水量来实现。同时,记录水头变化的数据,以便后续计算渗透系数。(5)计算渗透系数:根据测量的渗透速度和水头变化数据,利用适当的数学模型或图表法计算出土壤的渗透系数。

#### 2.2 现场测定法

##### 2.2.1 压水试验法

压水试验法是一种专门用于测定岩石和坚硬土壤渗透系数的实验室及现场检测方法。该方法的核心在于通过向钻孔内施加压力,并测量钻孔内水流量与压力之间的关系,进而推算出土壤的渗透系数。这一方法特别适用于现场检测,因为它能够更真实地反映实际工程条件下的渗透性能。以下是压水试验法的具体操作步骤:

(1) 准备钻孔：在选定的试验地点进行钻孔，钻孔的直径和深度应根据试验要求和工程条件进行确定。确保钻孔的垂直度和光滑度，以便进行准确的测量。(2) 安装测量设备：在钻孔内安装压力计和流量计，用于测量施加的压力和钻孔内的水流量。确保测量设备的准确性和可靠性，以便获得准确的试验数据。(3) 施加压力：通过向钻孔内注入水并施加压力，模拟实际工程条件下的渗透过程。压力的施加应逐渐进行，并记录不同压力下的水流量。(4) 测量水流量和压力：在施加压力的同时，测量钻孔内的水流量。通过流量计记录不同压力下的水流量数据。同时，记录施加的压力数据。(5) 计算渗透系数：根据测量的水流量和压力数据，利用适当的数学模型或图表法计算出岩石或坚硬土壤的渗透系数。

### 2.2.2 注水试验法

注水试验法是一种在现场直接测定土壤和岩石渗透性能的常用方法。该方法的原理是通过向钻孔或坑道中注入一定量的水，并测量注入水的量和时间的关系，进而推算出渗透系数。注水试验法特别适用于透水性能较好的土壤和岩石。以下是注水试验法的具体操作步骤和细节：(1) 准备钻孔或坑道：在选定的试验地点进行钻孔或开挖坑道，其尺寸和深度应根据试验要求和工程条件进行确定。确保钻孔或坑道的垂直度和光滑度，以便进行准确的测量。(2) 安装测量设备：在钻孔或坑道内安装流量计和计时器，用于测量注入水的量和时间。确保测量设备的准确性和可靠性，以便获得准确的试验数据。(3) 进行注水试验：向钻孔或坑道内注入一定量的水，同时开始计时。记录注入水的量和时间的关系，直到达到稳定状态或预定的试验时间。(4) 数据处理与分析：根据测量的注入水的量和时间数据，绘制注入量与时间的曲线图。分析曲线图的趋势，确定渗透系数。通常，渗透系数与曲线的斜率或特定时间点的注入量有关。(5) 计算渗透系数：利用适当的数学模型或经验公式，根据注入量与时间的关系计算出渗透系数。需要注意的是，注水试验法的计算过程可能涉及一些假设和近似，因此在实际应用中需要结合工程经验和地质条件进行综合判断。

## 3 土壤渗透性数据分析

### 3.1 数据处理

#### 3.1.1 去除异常值

异常值，也称为离群值或噪声数据，是指那些与大多数数据显著不同的数据点。这些值可能是由于测量错误、记录错误或仪器故障等原因产生的。在土壤渗透性数据分析中，异常值的存在会扭曲数据的真实分布，

影响分析结果的准确性。因此，需要识别并去除这些异常值。常用的异常值检测方法包括基于统计的方法（如 Z-score、IQR 等）和基于模型的方法（如孤立森林、局部异常因子等）。在实际应用中，可以根据数据的特性和分析需求选择合适的方法。

#### 3.1.2 数据平滑处理

数据平滑处理是一种减少数据噪声和波动性的技术，旨在使数据更加平滑和连续。在土壤渗透性数据分析中，数据平滑处理可以帮助揭示数据的潜在趋势和模式，提高数据的可读性和可解释性。常用的数据平滑方法包括移动平均法、指数平滑法、低通滤波等。这些方法通过计算数据点的平均值或加权平均值来平滑数据，减少随机波动的影响。

#### 3.1.3 误差分析

误差分析是评估数据测量或计算过程中产生的误差大小和性质的过程。在土壤渗透性数据分析中，误差分析对于确保数据的准确性和可靠性至关重要。误差可以分为系统误差和随机误差两种类型。系统误差是由于测量仪器、测量方法或环境条件等因素引起的规律性误差，可以通过校正或改进测量方法来减少。随机误差是由于随机因素引起的无规律性误差，无法完全消除，但可以通过增加测量次数和采用合适的统计方法来降低其影响。在进行误差分析时，需要计算误差的大小和方向，并评估其对分析结果的影响。如果误差较大或影响显著，需要采取相应的措施进行校正或调整。

### 3.2 渗透系数计算

在土壤渗透性数据分析中，渗透系数的计算是至关重要的环节。渗透系数（ $k$ ）是表征土壤或岩石渗透性能的重要参数，其计算通常基于达西定律（Darcy's Law）或相关试验原理。

#### 3.2.1 达西定律基础

达西定律是渗透系数计算的理论基础，它表述为：在层流状态下，渗流速度  $v$  与水力梯度  $i$  成正比，即：

$$v = k_i$$

其中， $k$  为渗透系数， $v$  为渗流速度， $i$  为水力梯度（通常表示为水头差  $\Delta h$  与渗径长度  $L$  的比值，即  $i = \Delta h/L$ ）。

#### 3.2.2 渗透系数计算方法

根据试验条件和数据来源的不同，渗透系数的计算方法可分为常水头法、变水头法和野外现场测定法（如压水试验法）等。

##### (1) 常水头法

准备试验装置，包括透明塑料筒、水阀、水位计等，确保试样装填均匀且饱和。打开水阀，使水自上而

下流经试样，待水头差和渗出流量稳定后，开始测量。记录单位时间内的渗流量 $Q$ ，同时测量试样横截面积 $A$ 和水头差 $\Delta h$ 。根据达西定律，利用公式 $k = (Q * L) / (A * \Delta h)$ 计算渗透系数。

### (2) 变水头法

准备渗透容器、变水头管、供水瓶等试验装置，确保装置密封性良好。充水至一定高度后开动秒表，记录起始水头差 $\Delta h_1$ 。经过一段时间后（通常为几分钟到几小时），记录终止水头差 $\Delta h_2$ 和时间间隔 $t$ 。根据瞬时达西定律和水流连续原理，利用公式 $k = (a * L) / (A * t) * \ln(\Delta h_1 / \Delta h_2)$ 计算渗透系数，其中 $a$ 为变水头管断面积。

### (3) 野外现场测定法（以压水试验法为例）

通过向钻孔内施加压力，测量钻孔内水流量和压力的关系，从而推算出渗透系数。步骤：在现场进行钻孔作业，达到预定深度后安装压水试验装置。向钻孔内施加一定压力，记录不同压力下的水流量 $Q$ 。根据试验条件和土壤特性选择合适的计算模型或经验公式进行渗透系数的推算。

### 3.2.3 注意事项

在进行渗透系数计算时，应确保试验数据的准确性和可靠性，避免异常值和误差的影响。根据土壤或岩石的渗透性能选择合适的测定方法，以提高计算结果的准确性。考虑试验条件、土壤性质以及数据处理等因素对计算结果的影响，必要时进行校正或调整。

## 4 渗透性影响因素分析

土壤的渗透性是一个复杂的物理特性，它受到多种因素的共同影响。以下是对土壤颗粒大小、形状、排列方式以及孔隙结构等内在因素，以及地下水位、土壤类型及施工扰动等工程实际条件对渗透系数影响的详细分析，旨在揭示土壤渗透性的内在机理。

### 4.1 内在因素对渗透性的影响

(1) 颗粒大小：土壤颗粒的大小对渗透性具有显著影响。一般来说，颗粒越大，土壤中的孔隙空间也越大，水分更容易通过，因此渗透系数较大。相反，细粒土壤（如黏土）的颗粒较小，孔隙空间有限，水分渗透困难，渗透系数相对较小。(2) 颗粒形状：颗粒形状也会影响土壤的渗透性。圆形或近似圆形的颗粒更容易形成较大的孔隙空间，有利于水分的渗透。而不规则形状的颗粒则可能形成更复杂的孔隙结构，对渗透性产生一定影响。(3) 排列方式：土壤颗粒的排列方式同样对渗透性有重要影响。紧密排列的颗粒会减小孔隙空间，降

低渗透性。而松散排列的颗粒则有利于形成较大的孔隙通道，提高渗透性。(4) 孔隙结构：土壤的孔隙结构是决定渗透性的关键因素之一。孔隙的大小、形状、连通性以及分布都会影响水分的渗透过程。大孔隙和连通性好的孔隙结构有利于提高渗透性，而小孔隙和封闭的孔隙结构则会降低渗透性。

### 4.2 工程实际条件对渗透性的影响

(1) 地下水位：地下水位的变化对土壤的渗透性有显著影响。当地下水位上升时，土壤中的孔隙空间可能被水分充满，导致渗透性降低。相反，地下水位下降时，孔隙空间中的水分减少，渗透性可能增加。(2) 土壤类型：不同类型的土壤具有不同的渗透性。例如，砂性土的渗透性通常较好，而黏性土的渗透性较差。在工程实践中，需要根据土壤类型选择合适的渗透性改善措施。(3) 施工扰动：施工过程中的扰动也会对土壤的渗透性产生影响。挖掘、填筑等施工活动可能破坏土壤的原始结构，改变颗粒排列和孔隙结构，从而影响渗透性。因此，在施工过程中需要采取相应措施来保护土壤结构，减少渗透性的变化。

## 结语

本文系统介绍了水利工程中土壤渗透性的试验检测与分析方法，包括实验室测定法和现场测定法，并详细阐述了数据处理和渗透系数计算的过程。通过深入分析土壤渗透性的影响因素，为水利工程的设计、施工及安全提供了理论依据和技术支持。未来研究可进一步探索新型渗透性检测技术的应用，如示踪剂法、热脉冲法及电阻率法等，以提高检测的精度和效率。同时，加强跨学科合作，推动土壤渗透性研究的深入发展，为水利工程的安全性和稳定性提供更加坚实的保障。

## 参考文献

- [1]周韩,罗璟,杨沛璋,等.基于土壤质地分类的土壤渗透性影响因素研究[J].人民长江,2023,54(08):153-159.
- [2]董均贵,吕海波,陈国强.基于核磁共振技术的孔隙水形态及土壤渗透性分析[J].农业工程学报,2020,36(06):74-80.
- [3]丁海晶,姜姜,张金池.土壤渗透性的区域变化规律及因子分析[J].水土保持学报,2019,33(01):51-56.
- [4]杨茂进,张越,施梦璐,等.崩岗土壤水分特征曲线与非饱和渗透系数分析[J].森林与环境学报,2023,43(04):433-441.