

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.05.030

# 饱和黏性土渗透系数测定方法综述

王鸣宇, 王秀艳, 孙琳

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

**摘要:** 饱和黏性土的渗透系数作为水文地质学中的一个重要参数, 其作用是不可忽略的。国内外对于饱和黏性土渗透系数的测定, 按测试地点的不同分为室内测试和现场测试方法。测试方法所采用的原理还是以达西定律和太沙基固结理论为主。对于饱和黏性土渗透系数的测试方法较多, 但目前尚未形成一套完整的测试体系, 测定的方法存在较多不足, 测定所选用的仪器也有较多不合理性, 为此, 回顾了渗透系数测定的历史, 探讨了饱和土渗流发生的机理, 并总结了饱和土渗透系数的室内测试方法和现场测试方法, 在介绍了传统的测试方法之后, 又介绍了溶质示踪法、固结曲线确定渗透系数等新的方法, 最后针对如何测定饱和土渗透系数进行了探讨。

**关键词:** 渗透系数; 饱和黏性; 土室内测试; 现场测试; 达西定律; 太沙基固结理论; 水文地质参数

**中图分类号:** P642 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1162-06

## Review on measurement methods of permeability coefficient in saturated clay

WANG Ming yu, WANG Xiur yan, SUN Lin

(Institute of Hydrogeology and Environment Geology, Chinese Academy of Geological Science, Shijiazhuang 050803, China)

**Abstract:** Permeability coefficient of saturated clay is an important parameter in hydrogeology, and its testing methods include laboratory and in situ methods according to different testing sites. Darcy's Law and Terzaghi consolidation theory are main theories applied in the testing methods. However, there is not a complete test system, and current testing methods and instruments have their own deficiencies and irrationality. In this paper, the history of measurement methods of permeability coefficient in the saturated clay is reviewed, the mechanism of the seepage in the saturated soil is discussed, and the laboratory and in situ testing methods are summarized. Besides the traditional testing methods, the new test methods to determine permeability coefficient, such as tracer method and consolidation curve, are introduced. Finally, the paper discusses how to determine permeability coefficient in the saturated soil.

**Key words:** permeability coefficient; saturated clay; laboratory test; in situ test; Darcy's Law; Terzaghi consolidation theory; hydrogeological parameters

渗透系数是水文地质学中的一个重要的水文地质参数。渗透系数(hydraulic conductivity)又称为水力传导系数,其物理意义为水力坡度为1时地下水在介质中的渗透速度。长时间以来,由于弱透水层的透水性较弱,其透水能力和透水量容易被人们忽视。事实上,在较大面积和较长时间的水文地质过程中,弱透水层中所流过的水量是不能忽略的。尤其是近年来,在涉及到水文地质、工程地质和环境地质等方面的问题上,一些学者和专家发现弱透水层在透水方面更是不应忽视的。黏性土是弱透水层的一个重要土层,其中发生的渗流过程和机理受到了越来越多的学者和专家的重视。由于黏性土的渗透性较弱,现场测定得到其准确的渗透系数非常困难。

国内外的专家、学者相继就这一问题进行了研究和探

讨:国内学者有张忠胤、冯晓皓<sup>[1,2]</sup>、宿青山<sup>[3]</sup>、刘维正<sup>[4]</sup>、王秀艳<sup>[5,6]</sup>、顾正维<sup>[7]</sup>、王君鹏<sup>[8]</sup>,国外学者有 Yi Jang Yeh<sup>[9]</sup>、Eugeniusz Sawicki<sup>[10]</sup>、V. V. Zhikhovich<sup>[11]</sup>等。目前在对饱和黏性土渗透系数测定所用到的方法中仍存在一定的争议,在测定过程中所采用的方法不同,测定的结果有较大的区别。鉴于饱和黏性土渗透规律的重要性,本文仅对饱和黏性土的渗透系数如何测定进行归纳和总结。

## 1 渗流机理

### 1.1 渗流理论

#### 1.1.1 达西定律

在饱和黏土的固结理论和渗透计算中,普遍应用的是达

收稿日期: 2015-01-15 修回日期: 2015-10-15 网络出版时间: 2015-11-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2201.050.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目“华北平原深层地下水超采引起的黏性土再固结效应研究”(40472139)

作者简介: 王鸣宇(1987-),男,山西临汾人,助理工程师,主要从事水文地质、工程地质方面研究。E-mail: wang1987qqmail@qq.com

西渗透定律<sup>[12]</sup>:

$$V = K \cdot I \text{ (或 } Q = K \cdot \omega \cdot \Delta h / L \text{)}$$

式中:  $V$  为渗透速度 (cm/s);  $I$  为水力坡度 (水头损失除以渗透途径);  $Q$  为渗透流量 (出口处流量, 通过砂柱各断面的流量) (cm<sup>3</sup>);  $\omega$  为过水断面 (实验中砂柱横断面面积) (cm<sup>2</sup>);  $h$  为水头损失 (上下游过水断面的水头差) (cm);  $L$  为渗透途径 (上下游过水断面的距离) (cm);  $K$  为渗透系数 (cm/s)。

由于达西定律的试验结果是基于砂土为试验对象的基础上建立起来的, 并且由于黏性土渗透系数较小, 所以针对饱和黏性土, 尚不能较好地反映其渗透规律。目前尚存在一定的分歧。主要的分歧在于饱和黏土渗流是否符合达西定律, 以及假定饱和黏土渗流偏离达西定律的情况下, 是否存在起始水力梯度<sup>[13]</sup>。

### 1.1.2 太沙基固结理论

为求饱和土层在渗透固结过程中任意时间的变形时, 通常采用太沙基提出的一维固结理论进行计算。固结理论的一条重要的假设是: 在孔隙水压力消散过程中, 土体的压缩系数和渗透系数均不变。基于此, 我们利用太沙基单向固结微分方程来计算渗透系数:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

其中:  $C_v = \frac{k(1+e)}{a_v \gamma_w}$

式中:  $u$  为在时刻  $t$ , 位置  $z$  处的超静水压力 (Pa);  $C_v$  为固结系数;  $k$  为渗透系数 (cm/s);  $e$  为孔隙比;  $a_v$  为压缩系数;  $\gamma_w$  为水的容重 (kN/m<sup>3</sup>)。

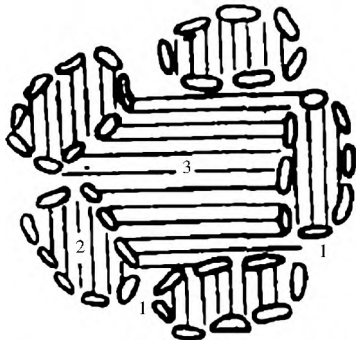
实际上, 太沙基固结理论有很多不足的地方, 利用其所测得的数值也并不十分准确。问延煦等<sup>[14]</sup> 就如何合理地测定固结系数  $C_v$  给出了较为全面的阐述。此外, 李顺群等<sup>[15]</sup> 通过实验和数据分析证明固结过程存在着明显的非线性, 并在此基础上推导出了饱和黏土一维渗流固结系数的表达式。

## 1.2 微观结构

### 1.2.1 土体中的孔隙

黏性土发生渗流的介质主要是分布其中的大小不一的孔隙。

冯晓腊等<sup>[1,2]</sup> 认为黏性土中的孔隙主要存在形式为: 粒间孔隙, 孤立孔隙, 粒内孔隙, 并根据孔径的大小分为大孔隙、中孔隙、微孔隙、超微孔隙 (图 1)。宿青山<sup>[3]</sup>、徐传福<sup>[16]</sup> 等认为黏性土中的孔隙主要存在形式为: 集粒间孔隙、集粒内孔隙、集粒间触点孔隙, 并根据孔径打大小分为大孔隙、微孔隙 (图 2)。两张说法略有差异, 但表达的内容基本上是一致的。



1-粒间触点水 2-聚集体内孔隙水 3-聚集体间孔隙水  
图 1 黏土孔隙中水的类型<sup>[1]</sup>  
Fig. 1 Type of water in pore of clay<sup>[1]</sup>

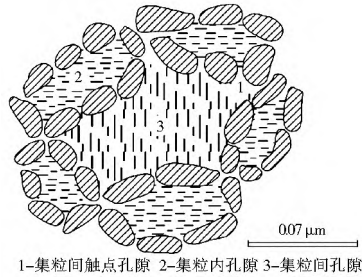


图 2 黏性土孔隙类型示意图<sup>[16]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of the type of water in pore of clay<sup>[16]</sup>

黏性土中的孔隙包括大孔隙、中孔隙、微孔隙和超微孔隙。不同孔隙中自由水和结合水所占比重不同。其中, 微孔隙数量最多, 对土的性质起决定作用, 微孔隙孔径变化范围大, 又可以进一步分为一级微孔隙、二级微孔隙和三级微孔隙<sup>[2]</sup>。

在外部加压的过程中, 随着孔隙体积和孔径的不断减小, 孔隙中的水不断排出。进一步分析, 是由于在外加荷载的情况下, 土体内各级孔隙变化不一。当压力较小时, 发生变化的主要是数量较少、连通性较差的大、中孔隙, 同时微孔隙略微增加, 两方面综合的效果使得渗透系数不断在减小, 但不是快速下降; 当压力较大时, 土体中微孔隙增加较快, 孔隙内主要存在的是微孔隙, 在自由水被排出后, 孔隙内以结合水为主, 结合水发挥主导作用, 孔隙比变化不大, 由此表现出渗透性不断减小, 但变化的程度较小并很快趋于稳定的特征<sup>[2]</sup>。周辉<sup>[17]</sup> 等在番禺 (PY) 和深圳 (SZ) 分别选取了土样, 用实验证明了随着黏性土所受固结压力的变化, 渗透系数相应变化的特征曲线 (图 3)。

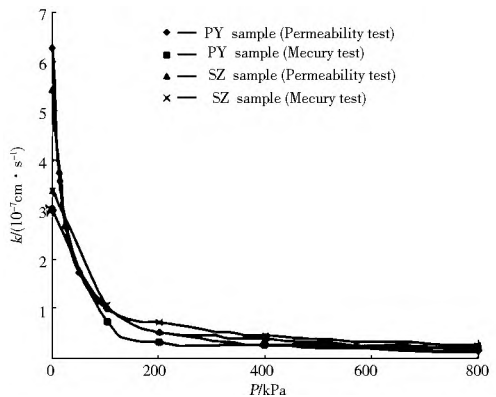


图 3 固结压力-渗透系数变化曲线<sup>[17]</sup>

Fig. 3 Variation curve of consolidation pressure and permeability coefficient<sup>[17]</sup>

随着外部荷载的变化, 内部各个孔隙的变化情况均不一样, 从而影响了结合水向自由水转化以及自由水向外渗出的不同程度, 进一步决定了从孔隙中流出水量的多少。

### 1.2.2 土体中的孔隙水

黏土中的水分主要分为重力水、毛细水、结合水。结合水具有一定的抗剪强度, 在一定的水头作用下, 只有一部分被克服了抗剪强度的弱结合水才能参与渗透。

冯晓腊等<sup>[2]</sup> 认为大孔隙中存在有重力水、毛细水、结合水; 中孔隙中以重力水、毛细水为主, 结合水次之; 微孔隙孔径变化范围大, 再分为三级: 一级微孔隙以重力水、毛细水为主, 二级微孔隙以结合水为主, 三级微孔隙中结合水占绝对

优势;超微孔隙中全部是结合水。

宿青山等<sup>[3]</sup>认为大孔隙中以重力水、毛细水为主,微孔隙中充满了结合水。

王秀艳<sup>[5]</sup>认为饱和黏性土孔隙水渗流规律是在不同水力梯度作用下重力水、毛细水、弱结合水共同综合作用的结果<sup>[5]</sup>。

### 1.3 渗流发生的机制

宿青山等<sup>[3]</sup>认为,在较小的水力梯度驱动下,只能引起大孔隙通道中的重力水渗透。随着水力梯度的增加,不仅使大孔隙通道中的重力水、毛细水的运动加强,而且还会引起超微孔隙通道中抗剪强度较小的结合水发生缓慢运动,称为隐渗(发生隐渗时的起始水力梯度为  $I_{01}$ )。在较大的水力梯度的驱动下,不仅使大孔隙通道中渗流加快,而且导致微孔隙通道中抗剪强度较大的结合水发生迁移,结合水的运动从隐渗转为显渗(发生显渗时的起始水力梯度为  $I_{02}$ )。同时,宿青山等将饱和黏性土渗透的  $V-I$  曲线分为三个阶段:第一个阶段( $0 < I < I_{01}$ ),仅有重力水在大孔隙通道中渗透;第二阶段( $I_{01} < I < I_{02}$ ),重力水在大孔隙通道中渗透和结合水在微孔隙中隐渗阶段;第三个阶段( $I > I_{02}$ ),重力水在大孔隙通道中渗透和结合水在微孔隙中显渗阶段。

王秀艳等<sup>[5]</sup>认为可以将黏性土的渗流规律  $V-I$  曲线划分为三部分(参看图 4):第一部分( $I < I_1$ ,  $I_1$  为渗透速度从缓慢到快速的分界点),以重力孔隙水运动为主,其渗流规律近似符合达西定律;第二部分( $I_1 < I < I_2$ ,  $I_2$  为由曲线到近直线的分界点),毛细水克服土颗粒的引力参与到重力水的渗流运动中;第三部分( $I > I_2$ ),参与运动的孔隙水有重力水、毛细水和一部分弱结合水。

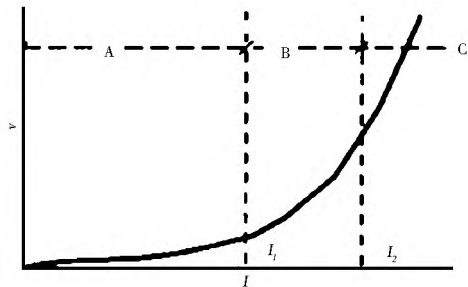


图 4 典型黏性土渗透规律曲线<sup>[5]</sup>

Fig. 4 Permeability rule curve of typical cohesive soil<sup>[5]</sup>

## 2 测试方法

饱和黏性土渗透系数的测试方法有很多,总体来讲分为室内测试方法和现场测试方法两大类。由于现场测试方法费时费力、成本较高,所以目前仍以室内测试方法为主。

### 2.1 室内测试方法

目前室内测试方法是饱和黏性土渗透系数测试的主要方法,涉及到的原理和其所适用的工程条件各有不同,下面一一介绍。

#### 2.1.1 变水头渗透试验

相对来讲,常水头试验适用于测定砂石等透水性较大的粗粒土,变水头试验更适用于测定透水性较小的黏土,因此接下来我们主要探讨变水头渗透试验。变水头渗透试验的

原理是在达西定律的基础上,测定在整个试验过程中,水头差随时间而发生的变化。

其用到的公式为:

$$K = \frac{\alpha L}{A(t_2 - t_1)} \ln \left[ \frac{h_1}{h_2} \right]$$

式中: $K$  为渗透系数(cm/s);  $h_1$  和  $h_2$  为分别对应  $t_1$  和  $t_2$  时刻的水头(cm);  $a$  和  $A$  分别为测试管和渗透试样的面积( $\text{cm}^2$ );  $L$  为渗透试样的长度(cm)。

(1) 由于黏性土在渗透变形的过程中,其渗透系数并不是恒定不变的。因此我们需要进一步分析,应该如何及时有效地测定不断变化着的饱和黏性土的渗透系数。基于这一理念,王秀艳<sup>[9]</sup>在曹文炳教授等的释水与越流试验仪的基础上进行了改进,研制出了方便快捷的固结联合渗透仪(图 5)。改进后的渗透仪有两大特点:渗透时间短;可模拟抽水条件下黏性土的释水变形过程。

其用到的公式为: $K = Q \cdot L / A \cdot h \cdot t^{1/9}$

式中: $K$  为渗透系数(cm/s);  $Q$  为经过时间  $t$  的渗水量(mL);  $L$  为试样高度(cm);  $A$  为试样面积( $\text{cm}^2$ );  $h$  为常水头(cm)。

刻度管可读出任意时刻的孔隙水渗出量,其他参数均可测量出来,从而通过计算得到渗透系数。

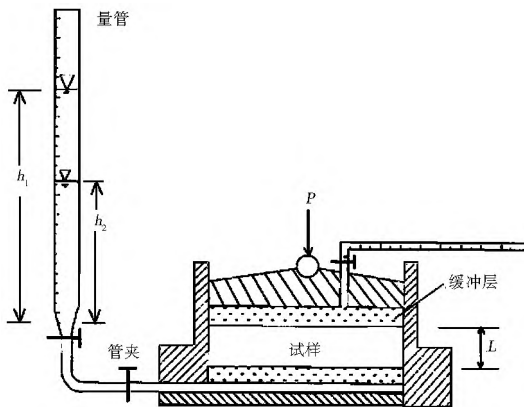


图 5 固结联合渗透试验示意图<sup>[6]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of combined penetration experiment and consolidation<sup>[6]</sup>

(2) 事实上,最初研制出来的变水头渗透试验装置还有很多不足,专家、学者在此基础上做了许多改进,如加反压力装置使饱和黏土达到饱和,采用内外双管封闭的渗透水管来测定渗透流量。另外,我们应该尽量避免在试验过程中所产生的误差。杜延龄<sup>[13]</sup>等集合了国内外现有测定黏土渗透特性仪器的优点,研制了一种由渗透仪容器、上下游平水盘、测流与测压管以及施加孔隙压力的设备组成的黏土渗透试验设备。经过验证,仪器得到的成果稳定可靠,且结构简单、操作方便、制作容易。

#### 2.1.2 太沙基固结试验

利用太沙基固结试验来测试渗透系数的原理为:太沙基固结理论的成立建立一条重要的假设之一土中渗流服从达西定律,渗透系数保持不变。我们通过做固结试验来间接求取渗透系数,正是用到了太沙基的这一基本假设。先通过固结试验确定固结系数  $C_v$ , 再通过固结系数  $C_v$  的定义来间接推算渗透系数  $K_s$ 。

$$C_v = K_v(1 + e_0)/\gamma_w m_v \quad (1)$$

式中： $C_v$  为固结系数( $m^2/s$ )； $K_v$  为渗透系数( $m/s$ )； $e_0$  为土体的初始孔隙比； $\gamma_w$  为水的容重( $kN/m^3$ )； $m_v$  为体积压缩系数( $MPa^{-1}$ )。

该试验的难度在于，在固结过程中，固结系数发生了改变，固结系数是一个变量，因此并不能准确地得到渗透系数的数值。GDS 先进固结试验系统<sup>[8]</sup>很好地克服了这一缺点。GDS 先进固结试验系统不仅可以进行传统固结试验，还可以在保持固结压力不变的条件下进行渗透试验，在同一试样上可以测得较为准确的渗透系数。

### 2.1.3 三轴渗透试验

三轴渗透试验是较适合于测量深层黏性土。该试验是通过测量深层黏性土孔隙水的渗出量来求其渗透系数的。三轴渗透试验的优点在于其对土样所处的环境如压力、湿度等能进行比较精确的模拟，以便让土样达到实际应力状态下的渗透状态，从而对土样的渗透系数进行较为准确的测定。

### 2.1.4 溶质示踪方法

该方法是将黏土试样和收集槽联接起来，通过示踪仪器，测定收集槽中示踪剂的浓度与时间的关系，来间接测定渗透系数。在水力梯度较低和流量较小的情况下适合用此方法。该方法突破了传统测定渗透系数的方法，采用水化学的角度，通过测定示踪剂浓度来测定渗透系数，给渗透系数的测定方法带来了新的思路。

测定示踪剂浓度的表达式为

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - u \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

式中： $C$  为在  $t$  时刻  $x$  距离处，示踪剂的浓度

测定渗透系数的表达式为

$$K = \left[ \frac{L \cdot V}{A \cdot h} \right] \cdot \left[ \frac{dC}{dt \cdot (C_0 - dC)} \right] \quad (3)$$

式中： $L$  为黏土试样的长度( $cm$ )； $A$  为黏土试样的横截面积( $cm^2$ )； $V$  为收集槽中纯水的原始体积( $cm^3$ )； $h$  为水头差( $cm$ )； $C_0$  为在  $x = 0$  处的示踪剂的浓度(ppm)。

Yr Jang Yeh<sup>[9]</sup> 在导出这个公式外，还用之前的文献结果以及另外的四组示踪试验对柱示踪仪的试验结果进行了验证，证明试验结果准确可靠(图6)。

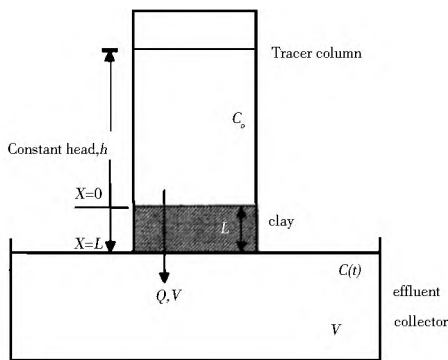


图6 常水头示踪测试的试验装置<sup>[9]</sup>

Fig. 6 Experimental equipment of tracer test with constant head<sup>[9]</sup>

## 2.2 现场测试方法

相比较于室内测试方法，由于现场测试方法的试验条件更接近实际土层的渗透情况，因此其测得的渗透系数比较可

靠和准确。现场测试渗透系数的方法有许多，常用的有钻孔注水试验和钻孔抽水试验。另外，本文还介绍一种利用孔压静力触探(CPTU)来确定黏性土渗透系数的方法。

### 2.2.1 钻孔注水试验

比起抽水试验，钻孔注水试验更适用于对弱透水层中黏性土的测定，可以根据黏土实际的渗透情况及时调整注水量，计算得到的结果精度较高。

#### (1) 钻孔常水头注水试验。

下面简要介绍两种常水头注水试验。

a. 向钻孔内注入稳定流量的清水，在流量和水位趋于稳定后，通过测定流量和水位值来计算土层的渗透系数。由于黏性土的渗透能力较弱，加上试验土层存在饱的问题，试验段应尽量在地下水位以下选取，式(4)就是当试验段位于地下水位以下时的情形(《规程》推荐的公式<sup>[10]</sup>)：

$$K = \frac{16.67Q}{AH} \quad (4)$$

式中： $K$  为试验岩土层的渗透系数( $cm/s$ )； $Q$  为稳定时的注入流量( $L/min$ )； $H$  为试验水头( $cm$ )，等于试验水位与地下水位之差； $A$  为试验段形状系数( $cm$ )，按照《水利水电工程注水试验规程》(SL 345-2007)选取。

b. 该试验是野外的一种简易的钻孔注水试验法，优点是方便快捷，但也有其局限性，只能粗略地测定黏性土水平向渗透系数。该试验原理与压水试验原理类似，用固定的水头向钻孔内注水，水通过孔壁四周向土体内渗透，根据土体的吸水量来测算黏性土的渗透系数。王振华<sup>[20]</sup>等根据经验关系式得到下列计算式。

当试验段底部距离隔水层的厚度大于试验段长度时：

$$K = 0.527\omega \cdot \lg(0.66L/r) \quad (5)$$

当试验段距离隔水层顶板之距离小于试验段长度时：

$$K = 0.527\omega \cdot \lg(1.32L/r) \quad (6)$$

式中： $\omega$  为单位吸水量( $L/(min \cdot m^2)$ )， $\omega = Q/(LS)$ ， $Q$  为稳定注水量( $L/min$ )， $L$  为试验段长( $m$ )， $S$  为试验水头(试验水头至压力计算零线的距离)( $m$ )； $r$  为试验段半径( $m$ )； $K$  为渗透系数( $m/min$ )。

#### (2) 钻孔变水头注水试验。

在实际工程中，为了减少成本，尽快地测得渗透系数，应用较多的是钻孔变水头渗透试验。该试验原理是利用试验水头下降的速度与时间的关系，计算试验土层的渗透系数。在达西定律和滞后时间<sup>[21]</sup>的原理上，得到如下公式：

$$K = A/(F \cdot t) \quad (7)$$

式中： $A$  为蓄水管的横截面积( $cm^2$ )； $F$  为试验段和蓄水管的几何形状系数( $cm$ )； $t$  为滞后时间( $min$ )。

在实际工程中由于不同的目的， $A/F$  项应代入相应不同的值。由于钻孔对渗透土层的扰动，试验过程中难免会带来一些误差，但经过验证，试验结果相对来说能够比较客观地反映土层的渗透规律。

### 2.2.2 钻孔抽水试验

由于黏性土透水性能较弱，而且一般来讲抽水含水层的边界形状以及边界条件较为复杂，找到合适的公式来计算黏性土的渗透系数比较困难。周志芳<sup>[22]</sup>等采用镜像法原理和势叠加原理，提出了确定边界附近有越流承压不完整并含水

层水文地质参数的计算公式和计算方法。该试验方法主要用到的公式如下:

$$T = 0.366 \frac{\beta Q}{\beta + 1} \frac{1}{i} \quad K = \frac{T}{M} \quad (8)$$

式中:  $T$  为承压含水层导水系数 ( $\text{m}^2/\text{d}$ );  $\beta$  为修正系数;  $Q$  为完整井的流量 ( $\text{m}^3/\text{d}$ );  $i$  为不同径向距离上观测到的降深所做直线的斜率;  $M$  为承压含水层厚度 ( $\text{m}$ )。

该试验方法简单、有效,具有可通过一次抽水试验便可确定渗透系数的优点,适用于在复杂定解条件下求解黏性土的渗透系数。

### 2.2.3 孔压静力触探

孔压静力触探测试的原理是用静压力将标准规格的圆锥形探头匀速地压入土体中,同时利用电测技术测定圆锥的锥头阻力、触探仪钻杆的侧壁摩擦力和锥头后的孔隙水压力,来确定土层划分和土体的各种参数。孔压静力触探测试方法相比较于钻孔注水和钻孔抽水测试方法,具有间接、灵敏、快速、高效的优点。

王君鹏<sup>[8]</sup>等在总结前人工作的基础上,提出孔压静力触探时锥头处呈球冠形孔隙水流动的计算模型,并推导出土体渗透系数的表达式为

$$K = \frac{\sin^2 \frac{\alpha}{2}}{0.3e^{-\alpha^3} \left( \frac{1}{\sin} - 1 \right)} \frac{\alpha v_w K_D U}{\sigma_v} \quad (9)$$

式中:  $K$  为土体的渗透系数 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $\alpha$  为锥头角度 ( $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ );  $a$  为锥头半径 ( $\text{m}$ );  $v_w$  为水的重度 ( $\text{N}/\text{m}^3$ );  $K_D$  为渗透系数指数;  $U$  为锥头触探速度 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $\sigma_v$  为初始的竖向有效应力 ( $\text{N}/\text{m}^2$ )。

经过验证,改进后的公式计算得到的渗透系数更加接近于实验室测试得到的结果,精确度较高。

## 2.3 其它测试方法

除常规的测试方法外,下面介绍另外两种间接测定渗透系数的方法。

### 2.3.1 从固结曲线上确定渗透系数

在常规的实验室条件下,在对黏土的渗透系数测定中,存在着一些误差,这些误差主要来源于:提供迫使水通过土样动力的不稳定性以及水通过土样通道的不可控性。这些误差在常规的试验中是不可避免的。因此,我们尝试通过其它一些方法来求取渗透系数。

在固结过程中,可以分为两个连续的阶段:初固结和次固结阶段。Eugeniusz Sawich<sup>[10]</sup>和 Joanna Strozyl<sup>[10]</sup>发现,在初固结的初始阶段,主要是气泡的溶解和孔隙的填满,接着是溶解先前气泡的水部分压缩,在指定的荷载下,当溶解有气泡的水变得不可压缩时,土样的沉降量仅取决于水的挤出量,此时,沉降速度等于孔隙水的挤压速度,即渗透速度。V. V. Zhikhovich<sup>[11]</sup>也指出,在上述的过程中并未发生显著的流变过程,在孔隙水被挤出的短时间内,固结曲线是呈线性变化的。由此通过公式(10)得到固结系数。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (10)$$

式中:  $u$  为孔隙水压力 ( $\text{Pa}$ );  $C_v$  为固结系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

再由公式(11)得到渗透系数

$$C_v = \frac{K M_o}{\gamma_w} \quad (11)$$

式中:  $C_v$  为固结系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $K$  为渗透系数 ( $\text{m}/\text{s}$ );  $M_o$  为主压缩面上的压缩模量 ( $\text{MPa}^{-1}$ );  $\gamma_w$  为水的容重 ( $\text{N}/\text{m}^3$ )。

该试验方法虽然经过严密的理论公式的推导,但其试验结果仍然避免不了一些经验的因素,如:渗透速率恒定的时间段需要人为判断,这就使得试验结果带有一些主观因素,因此试验方法有待于进一步的推敲和验证。

### 2.3.2 渗透模型

刘维正<sup>[4]</sup>总结前人经验,建立了适用范围更广、线性化更明显的  $\lg(1+e) - \lg kv$  渗透模型,能更好地反映渗透系数随孔隙比的变化规律。但该模型的缺点在于:仅分析了在压缩过程中竖直向渗透系数的变化,而在黏土的各向异性对渗透特性的影响上,并未做出全面的分析。

为了更好地反映黏土的力学特性,国内外学者建立了在微观上能够反映土体力学性质的本构模型,以及考虑黏土各向异性的微观弹塑性本构模型<sup>[23]</sup>。

在以后的研究工作中,进行模拟可以在以下两方面做进一步的研究。

(1) 黏土体的构成。黏土体中孔隙类型、不同类型孔隙的多少、发生固结时不同类型孔隙之间的转化程度。

(2) 在渗流过程中,发生隐渗或是显渗时弱结合水向自由水的转化程度。

## 3 讨论与结论

(1) 在求渗透系数的过程中,广泛用到了达西定律和太沙基单向固结理论。达西定律的应用更适用于砂类土,在黏性土的适用方面尚存在一定的分歧,还有待进一步研究。太沙基理论的成立存在着一些理想的假设,在实际应用时,黏土周围的环境并不能很好地满足这些假设,从而造成一定的误差。应多从这些角度入手,才能更好地减小误差,使得试验结果更为精确。

(2) 根据不同的试验目的和要求,国内外专家和学者研制出不同的试验仪器和试验方法,来更好地推导和测定渗透系数。在渗透系数-水力坡度曲线上,黏性土从发生渗流到进入稳定渗流的阶段上应受到更多的关注。

(3) 测试黏性土渗透系数的仪器有很多,方法、原理不一,应尽量从减少误差的方面去改进试验仪器,使得测定的结果更为精准。

(4) 在室外测定黏性土的渗透系数时,应设法尽量减少对原状土的扰动,保护原状土的结构不被破坏。

(5) 在对黏性土进行模型模拟时,尽量从孔隙的类型、孔隙的多少、结合水转化的微观角度进行分析和讨论。

### 参考文献(References):

- [1] 冯晓蜡. 饱和黏性土渗透性的研究现状及其发展方向[J]. 地质科技情报, 1988, 7(3): 53-57. (FENG Xiaola. Permeability research of saturated cohesive soil and its future development[J]. Geological Science and Technology Information, 1988, 7(3): 53-57. (in Chinese))
- [2] 冯晓蜡,沈孝宇. 饱和黏性土的渗透固结特性及其微观机制的研究[J]. 水文地质工程地质, 1991, 18(1): 8-9. (FENG Xiaola, SHEN Xiaoyu. Research on osmotic consolidation characteristics

- and microcosmic mechanism in saturated clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 1991, 18(1): 8-9. (in Chinese)
- [3] 宿青山, 侯杰, 段淑娟. 对饱和黏性土渗透规律的新认识及其应用[J]. 长春科技大学学报, 1994, 24(1): 52. (SU Qing-shan, HOU Jie, DUAN Shu-juan. A new recognition on the law of water seepage in saturated cohesive soil and its application[J]. Journal of Changchun University of earth sciences, 1994, 24(1): 52. (in Chinese))
- [4] 刘维正, 石名磊, 繆林昌. 天然沉积饱和黏土渗透系数试验研究与预测模型[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2501-2507. (LIU Wei-zheng, SHI Ming-lei, MIAO Lin-chang. Experimental study of permeability coefficient of natural saturated clay and its prediction model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2501-2507. (in Chinese))
- [5] 王秀艳, 刘长礼. 对黏性土孔隙水渗流规律本质性的新认识[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 94. (WANG Xiuyan, LIU Changli. New understanding of the regularity of water seepage in cohesive soil[J]. Journal of earth, 2003, 24(1): 94. (in Chinese))
- [6] 王秀艳. 深层坚硬黏性土渗透变形特性的研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2003. (WANG Xiuyan. The Study of seepage and deformation for deep clayed soil[D]. Jilin, Jilin University, 2003. (in Chinese))
- [7] 顾正维, 孙炳楠, 董邑宁. 黏土的原状土、重塑土和固化土渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(3): 505-508. (GU Zhengwei, SUN Bingnan, DONG Yining. Testing study of permeability of the original clay, recomposed clay and improved clay with stabilizer ZDYT-1[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(3): 505-508. (in Chinese))
- [8] 王君鹏, 沈水龙. 基于孔压静力触探确定土体的渗透系数[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3336-3337. (WANG Junpeng, SHEN Shuilong. Determination of permeability coefficient of soil based on CPTU[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3336-3337. (in Chinese))
- [9] Yr Jang Yeh, Cheng Haw Lee, Shih Tsu Chen. A Tracer Method to Determine Hydraulic Conductivity and Effective Porosity of Saturated Clays under Low Gradients[J]. Groundwater, 2000, 38(4): 522-528.
- [10] EUGENIUSZ S, JOANNA S. Determination of Permeability Coefficient of Saturated Clay Based on Linear Segment of Settlement curve[J]. Studia Geotechnica et Mechanica, 2009, 31(4): 73-76.
- [11] V V Zhikhovich. Determination of the Permeability Coefficient of Saturated Clay from the Settlement Curve in a Compression Test[J]. Power Technology and Engineering, 1981, 15(12): 767-771.
- [12] 王大纯, 张人权, 史毅虹. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1994. (WANG Dachen, ZHANG Renquan, SHI Yihong. The Basis of Hydrogeology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese))
- [13] 杜延龄, 李春华, 徐家海. 研究饱和黏土渗透特性的试验装置[J]. 水利学报, 1980(4): 71-74. (DU Yanling, LI Chunhua, XU Jiahai. The studying of testing device of permeability in saturated clay[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980(4): 71-74. (in Chinese))
- [14] 问延煦, 施建勇. Terzaghi 一维固结理论研究综述[J]. 西部探矿工程, 2003(2): 1-2. (WEN Yanyu, SHI Jianyong. Current research of terzaghi one dimensional consolidation theory[J]. West China Exploration Engineering, 2003(2): 1-2. (in Chinese))
- [15] 李顺群, 张业民, 裴玉萍. 饱和黏土一维固结系数的非线性研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2002, 21(6): 726-729. (LI Shunqun, ZHANG Yemin, PEI Yuping. Study of one dimensional nonlinear coefficient of consolidation of saturated clay[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2002, 21(6): 726-729. (in Chinese))
- [16] 许传福. 弱透水层饱和黏性土中水分渗透规律研究[J]. 吉林地质, 2008, 21(1): 30-32. (XU Chuafu. Studying the permeability regularities of water in less permeable and saturated clay[J]. Jilin Geology, 2008, 21(1): 30-32. (in Chinese))
- [17] ZHOU Hui, FANG Yingguang, GU Renqun, et al. Microscopic Analysis of Saturated Soft Clay in Pearl River Delta[J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(2): 504-510.
- [18] 谢康和, 庄迎春, 李西斌. 萧山饱和软黏土的渗透性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 591-593. (XIE Kanghe, ZHUANG Yingchun, LI Xibin. Laboratory investigation of permeability characteristics of Xiaoshan clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 591-593. (in Chinese))
- [19] 张贻火. 钻孔注水试验方法浅析[J]. 资源环境与工程, 2008(5): 31-32. (ZHANG Yihuo. Analyses of test methods of the borehole water injection[J]. Resources Environment & Engineering, 2008, (5): 31-32. (in Chinese))
- [20] 王振华, 周祯, 林硕庆. 黏性土渗透系数野外快速测定法[A]. 第二届全国岩土与工程学术大会论文集[C]. 2006. 43. (WANG Zhenhua, ZHOU Zhen, LIN Shuoqing. The fast method in situ testing of permeability coefficient of clayed soil(A). The Second National Geotechnical and Engineering Conference Proceedings[C]. (in Chinese))
- [21] 祝凤海. 钻孔变水头渗透试验原理与计算[J]. 勘察科学技术, 2009, (1): 42-43. (ZHU Fenghai. The principle and calculation of borehole falling head permeability test[J]. Site Investigation Science and Technology, 2009, (1): 42-43. (in Chinese))
- [22] 周志芳, 汤瑞凉, 汪斌. 基于抽水试验资料确定含水层水文地质参数[J]. 河海大学学报, 1999, 27(3): 5-8. (ZHOU Zhifang, TANG Ruiliang, WANG Bin. Determination of hydrogeological parameters of leaky aquifer based on pumping test data of partially penetrating well near the boundary[J]. Journal of Hohai University, 1999, 27(3): 5-8. (in Chinese))
- [23] 孔令荣. 饱和软黏土的微结构特性及其微观弹塑性本构模型[D]. 上海: 同济大学, 2007. (KONG Lingrong. Microstructural behavior of saturated soft clay and an elastoplastic constitutive model considering microstructure[D]. Shanghai: Tongji University, 2007. (in Chinese))