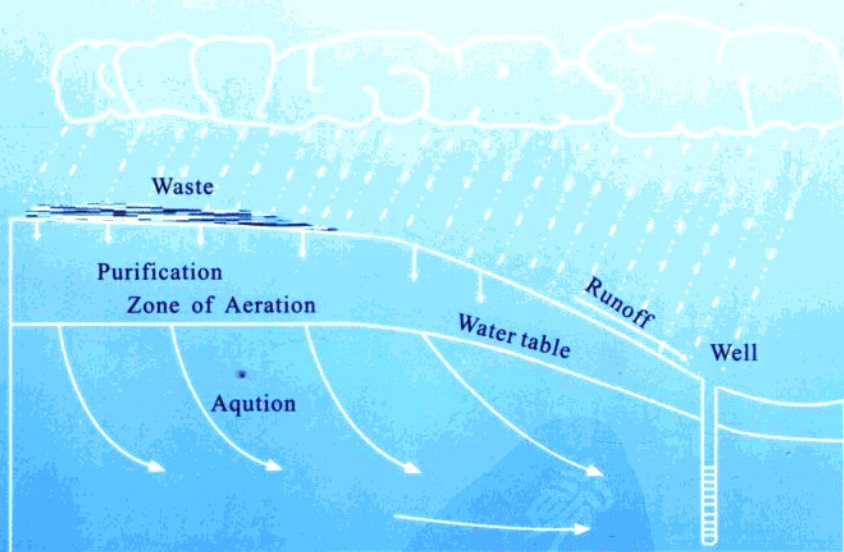


地下水实验技术与方法

EXPERIMENTAL TECHNOLOGY AND METHOD ON GROUNDWATER

范高功 杨胜科 姜桂华 编著



西安地图出版社

地下水实验技术与方法

EXPERIMENTAL TECHNOLOGY AND METHOD ON GROUNDWATER

范高功 杨胜科 姜桂华 编著

西安地图出版社

内 容 简 介

本书较系统地介绍了地下水实验技术与方法,内容包括岩石(土)水理性质实验,水力学及渗流实验,多孔介质的水动力弥散实验,环境水文地球化学实验,水体中物理学指标测定,水体中无机、有机化学成分监测技术,水样的采集与保存方法,水体中细菌学检验等技术的基本原理、实验流程、结果计算、问题讨论等。可供环境科学、环境工程、水文学与水资源、勘察技术与工程、地质工程及相关专业的研究人员和工程技术人员参考,也适宜于作为高等院校相关专业学生的实验教材。

图书在版编目(CIP)数据

地下水实验技术与方法/范高功编著. - 西安:西安地图出版社,2002.7

ISBN 7-80670-292-X

I. 地... II. 范... III. 地下水-实验
IV. P641.12-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 053620 号

地下水实验技术与方法

范高功 杨胜科 姜桂华 编著

西安地图出版社出版发行

(西安友谊东路 334 号 邮政编码 710054)

新华书店经销 长安大学雁塔印刷厂印刷

787 毫米×1092 毫米·1/16 开本 10 印张 250 千字

2002 年 7 月第 1 版 2002 年 7 月第 1 次印刷

印数 0001~1000

ISBN 7-80670-292-X/P·3

定价:32.00 元

前 言

传统的水文地质工作主要通过大量的勘探来获取水文地质信息,而这种手段远远不够,尚需得益于数学、化学、计算机技术等学科的广泛渗透,得益于由此而产生的研究方法和实验技术的不断创新。掌握和了解地下水实验技术与方法,是从事地下水与环境领域乃至其它相关学科研究工作十分重要的前提。为此,我们总结了近几年来的教学科研实践,并吸取国内外成熟的经验和信息资料,编著了《地下水实验技术与方法》一书。本书的特点是:①以实验项目为纲,介绍地下水方面的基本实验理论、技术与方法;②各个实验项目既可以单独安排教学,也可以相互联系组合成较系统和较深入的综合实验,以适应本科生及研究生等不同层次的教学需要;③每一节实验前,比较详细地介绍了与实验内容相关的基本理论知识和方法学原理,便于读者深刻理解实验原理和技术流程,从而有效地进行实验操作。

全书共分九章。第一章介绍岩石(土)水理性质实验;第二章介绍水力学及渗流实验;第三章介绍多孔介质的水动力弥散实验;第四章介绍环境水文地球化学实验;第五、六、七、八章介绍水体中无机、有机成分的测定方法;第九章介绍水样的采集和保存方法,同时还简要介绍了水体中细菌学检验方法。

本书由长安大学范高功、杨胜科、姜桂华老师编著。另外长安大学李翔、杨晓婷老师也参加了部分章节的编写工作。长安大学孙秀英老师,为该书的编著提供了有价值的实验资料;博士生导师李云峰教授、博士生导师王文科教授对本书的编著工作给予了悉心指导与帮助,在此表示衷心的感谢。

本书是国内外地下水实验技术与方法研究成果和作者近年来教学实践经验的总结。参考资料恕不全部列出,仅在书后列出主要参考文献,作者在此深表感谢,并请原著者谅解。

虽然我们作了很大的努力,但水平有限,疏漏和错误之处,恳请读者予以批评指导。

作 者

二〇〇二年一月

目 录

第一章 岩石(土)水理性质实验	(1)
§ 1.1 岩石(土)容水度、给水度、持水度的测定	(1)
§ 1.2 岩石(土)渗透系数的实验室测定	(5)
§ 1.3 观测土中水的毛细运动的实验	(9)
第二章 水力学及渗流实验	(12)
§ 2.1 压强的表示及测量方法	(12)
§ 2.2 静水压强实验	(14)
§ 2.3 水流的能量转换实验	(17)
§ 2.4 文丘里流量计实验	(19)
§ 2.5 动量定律实验	(23)
§ 2.6 雷诺实验	(25)
§ 2.7 渗流槽模拟实验	(30)
§ 2.8 窄缝槽模拟实验	(34)
§ 2.9 水电比拟实验	(36)
第三章 多孔介质的水动力弥散实验	(45)
§ 3.1 水动力弥散现象观察实验	(45)
§ 3.2 弥散系数测定实验	(49)
§ 3.3 吸附实验	(56)
第四章 环境水文地球化学实验	(59)
§ 4.1 岩溶水中碳酸平衡	(59)
§ 4.2 粘土矿物的交换吸附作用	(62)
§ 4.3 地球化学垒垒梯度的测定	(66)
§ 4.4 地下水对岩石的侵蚀作用	(69)
第五章 地下水物理指标的测定	(73)
§ 5.1 地下水温度及色度的测定	(73)
§ 5.2 臭及味的测定	(75)
§ 5.3 透明度和浑浊度的测定	(76)
§ 5.4 悬浮物及可溶性固体总量的测定	(77)

§ 5.5 电导率的测定	(80)
第六章 地下水主要化学成分测定	(83)
§ 6.1 Eh 值及 pH 的测定	(83)
§ 6.2 二氧化碳的测定	(87)
§ 6.3 碱度及碳酸根测定	(89)
§ 6.4 钾、钠的测定	(91)
§ 6.5 钙、镁及水的硬度测定	(92)
§ 6.6 氯化物的测定	(96)
§ 6.7 硫酸盐的测定	(99)
§ 6.8 溶解氧的测定	(103)
第七章 地下水中无机污染物测定	(106)
§ 7.1 铅和镉的极谱法测定	(106)
§ 7.2 铬的测定	(109)
§ 7.3 汞的测定	(110)
§ 7.4 砷的测定	(113)
§ 7.5 硝酸盐、亚硝酸盐及铵盐的测定	(117)
§ 7.6 氟化物和氰化物的测定	(121)
第八章 地下水有机污染物测定	(126)
§ 8.1 化学需氧量(COD)的测定	(126)
§ 8.2 生化需氧量(BOD)的测定	(129)
§ 8.3 酚的分光光度法测定	(131)
§ 8.4 有机氯农药的测定	(134)
§ 8.5 有机磷农药的测定	(136)
§ 8.6 阴离子洗涤剂的测定	(139)
第九章 水样采集及细菌学指标测定	(141)
§ 9.1 水样采集方法	(141)
§ 9.2 水样保存方法	(142)
§ 9.3 水样细菌总数的测定	(147)
§ 9.4 水中大肠杆菌群的测定	(149)
参考文献	(155)

第一章 岩石(土) 水理性质实验

§ 1.1 岩石(土) 容水度、给水度、持水度的测定

一、实验原理

容水度:容水度(W_0)是表示岩石(土)容水性能强弱的指标,是在天然条件下岩石(土)容纳外来液态水的最大容积水量(V_{w_0})与岩石(土)整体体积(V)的比值。以小数或百分数表示。

$$W_0 = \frac{V_{w_0}}{V} \text{ 或 } W_0 = \frac{V_{w_0}}{V} \times 100\%$$

给水度:岩石(土)给水性能的强弱通常采用给水度表示。给水度(μ)是重力作用下,饱水岩石(土)释出的容积水量(V_r)与岩石(土)总体积(V)的比值。以小数或百分数表示。

$$\mu = \frac{V_r}{V} \text{ 或 } \mu = \frac{V_r}{V} \times 100\%$$

持水度:持水度(W_c)是岩石(土)空隙中最大限度保持的容积水量(V_c)与岩石(土)总体积(V)的比值。以小数或百分数表示。

$$W_c = \frac{V_c}{V} \text{ 或 } W_c = \frac{V_c}{V} \times 100\%$$

实验中,使岩石(土)孔隙充水,达到饱和和所需的水量即为容水量。然后,在重力作用下,让水自由流出,直至完全没有水流出为止,流出的水量即为给水量。容水量与给水量之差即是岩石颗粒表面上所吸附的最大水量。

求出容水量、给水量代入公式计算,即可求出岩石的容水度、给水度、持水度。

二、实验仪器和用品

1. 给水度仪(图 1-1-1)。
2. 十二指肠减压器,用以抽吸气体。
3. 量筒(25mL)和胶头滴管。
4. 松散岩石(土)试样:砾石(粒径为 5 ~ 10mm,大小均匀,磨圆好);砂(粒径为 0.25 ~ 0.45mm);砂砾混合样(指把上述砂样完全充填进砾石样的孔隙中得到的一种新试样)。

三、实验步骤

1. 标定透水石的负压值

透水石是用一定直径的砂质颗粒均匀胶结成的多孔板。透水石的负压值是指在气、液、固三相介质界面上形成的弯液面产生的附加表面压强。标定方法如下:

首先,饱和透水石并使试样筒底部漏斗充满水(最好用去气水,即通过加热或蒸馏的方法

去掉水中部分气体后的水)。具体做法是,将试样筒与底部漏斗一起从开关a处卸下(见图1-1-1),浸没于水中并倒置,将漏斗管口与十二指肠减压器抽气管连接,抽气使透水石饱水,底部漏斗全充满水。用弹簧夹在水中封闭底部漏斗管,倒转试样筒,将装有水(可以不满)的试样筒放回支架。同时打开a、b两开关,在两管口同时流水的情况下连接塑料管。关闭a、b开关,倒去试样筒中剩余的水,将A滴定管液面调至零刻度,并与透水石底面水平。

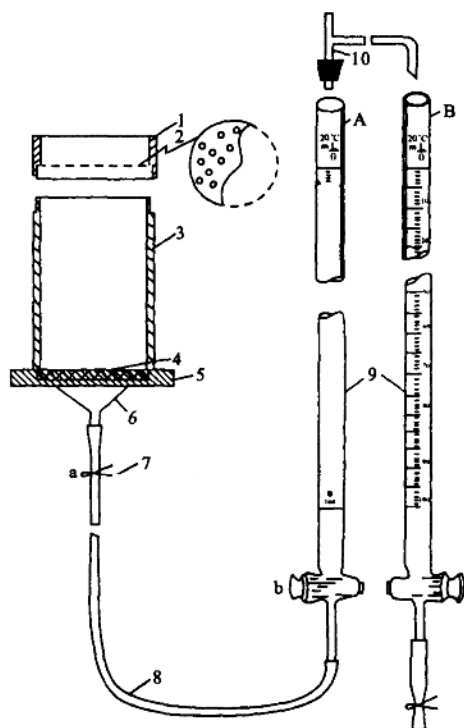


图1-1-1 给水度仪装置图

- 1 - 装样筛; 2 - 筛板; 3 - 试样筒; 4 - 透水石;
5 - 固定连接板; 6 - 试样筒底部漏斗; 7 - 弹簧夹;
8 - 硬塑料管; 9 - 滴定管; 10 - 三通管

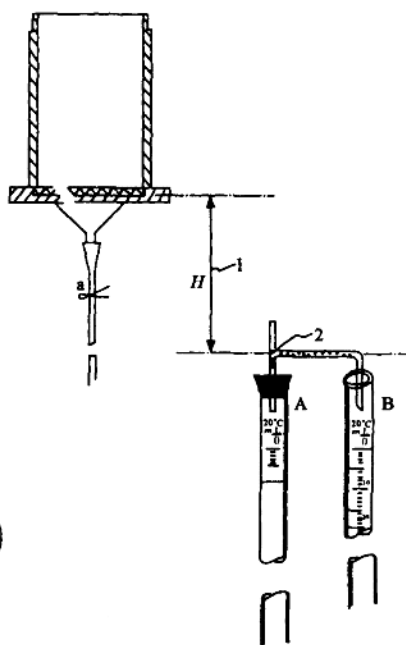


图1-1-2 退水时给水度仪装置示意图

- 1 - H 为三通管液面到透水石底面的距离;
2 - 三通管液面

第二步,测定透水石的负压值。打开a、b开关,缓慢降低A滴定管,同时注意观测其液面的变化。当滴定管液面突然上升时,立刻关闭b开关。此时滴定管液面到透水石底面的高度就是透水石的负压值。

反复测定几次,选其中最小数值(指绝对值)作为实验所采用的负压值。

2. 标定试样筒的容积

将试样筒装满水,用量筒或滴定管测出所装水的体积即为试样筒的容积。

3. 装样

装样前,将 A 滴定管液面调到零刻度,关闭 a、b 开关,用干布把试样筒内壁擦干(注意不要将干布接触透水石)。装砾石样和砂样时,不用安装装样筛,直接将试样逐次倒入试样筒并轻振试样筒以保证试样密实,尽量使之接近天然状态,直至与试样筒口平齐。装砂砾混合样时,先按上述方法把砾石装满,再安装装样筛,将砂样从装样筛中漏入,直至完全充填砾石样孔隙。

4. 测定容水度

适当抬高滴定管,使其液面略高于试样筒口。打开 a、b 开关(同时用手表计时),用 b 开关控制进水速度。试样饱水后立即关闭 b 开关。记下 A 滴定管进水量及饱水累计时间,填入表 1-1-1。进水量(体积)与试样筒容积之比就是这种试样的容水度。

5. 测定给水度

将 A 滴定管加满水并装上三通管。用胶头滴管调整三通管液面(如图 1-1-2)。将 B 滴定管初始刻度调至 100mL 处。同时降低 A、B 滴定管后,打开 b 开关,使从试样中退出的水沿三通管进入 B 滴定管。退水过程中,三通管液面到透水石底面的距离不得大于透水石的选用负值。退水终止后,将退水量和累计退水时间记入表 1-1-1。退水量(体积)与试样体积之比就是试样的给水度。

6. 重复上述 3、4、5 步骤,测定另两种试样的容水度和给水度(也可以分组测定不同试样,各组交换实验记录)。

四、实验成果

完成实验报告表(表 1-1-1)。

思考题:

1. 从试样中退出的水是什么形式的水?退水结束后,试样中保留的水是什么形式的水?
2. 根据实验结果,分析比较松散岩石的容水度、给水度、持水度与粒径和分选的关系。

§ 1.2 岩石(土) 渗透系数的实验室测定

渗透是地下水流经多孔介质的一种运动形式。渗透系数是表征多孔岩石(土) 透水性能和其中地下水与运动有关的物理状态的一个参数。它是研究有关地下水在岩石(土) 空隙中渗透时的重要水理性质指标, 是进行各种水文地质计算的重要参数。

测定渗透系数的方法有:

野外测定方法 —— 抽水、渗水、压水等试验。

室内测定方法 —— 达西仪、戚姆仪等方法。

一般说来, 野外测定渗透系数的方法, 能够比较客观地反映实际, 精度较高, 但成本也较高。室内测定渗透系数的方法, 是选择野外一些代表点, 取扰动土样, 然后在室内用仪器进行实验。因此, 与天然情况差异较大, 所测定的数值比较粗略。但它的做法简单, 成本较低, 对一般要求不高的工程或大概地了解地区岩石(土) 的渗透能力是比较适用的。

一、实验原理

地下水在含水层中呈层流状态运动时, 单位时间通过过水断面的流量为:

$$Q = K \cdot I \cdot \omega$$

Q — 渗透流量(cm^3/s);

K — 渗透系数(cm/s);

ω — 过水断面面积(cm^2);

I — 水力坡度($I = \frac{\Delta h}{L}$, Δh 为水位差, L 为渗透距离)。

实验时, 可直接测定渗透流量 Q , 过水断面面积 ω 和水力坡度 I , 从而可以求出渗透系数 K 。

$$K = \frac{Q}{I\omega}$$

二、实验仪器及用品

实验室用来测定岩石(土) 的渗透系数的仪器有达西仪和戚姆仪, 二者基本原理相同, 实验方法也大体相同, 所不同的是, 达西仪由底部供水, 低水位固定, 调节高水位; 戚姆仪由上部供水, 高水位固定, 调节低水位, 即溢水管。这里只介绍达西仪。

1. 达西仪(见图 1-2-1)。

达西仪, 包括金属圆筒, 底部装有金属网。金属筒侧壁有三个测压孔, 测孔间距为 10cm。通过胶管连接测压孔和测压板上的玻璃管。根据测压板上的刻度观测玻璃管中的水头。还有供水装置(水箱或供水瓶), 供水装置可上下移动, 起水位调节器的作用, 通过胶管与进水管相连。供水瓶(或供水箱) 上部有溢水孔, 以保持渗透过程中水位恒定。

2. 其它: 量筒、水槽、温度计、秒表、捣棒、橡皮管、直尺、方格纸($20\text{cm} \times 25\text{cm}$)、计算器等。

三、实验步骤

1. 测量仪器的几何参数

分别测量过水断面面积 ω , 测压孔间距(为 10cm) 或渗透途径(L), 记入表 1-2-1。

2. 装填试样

(1) 将试样装入金属圆筒内的金属网格上,每装 2~3cm 厚时,均用捣棒轻轻捣实,使其尽量接近天然状态下的结构。如果试样是细粒的粘性土,则应在金属网上铺上一层粗砂(厚约 2cm)作为缓冲层,以防细粒被水冲走。

(2) 每层试样装好捣实后,都要缓慢地打开进水开关,使水由仪器底部向上渗透,让试样逐渐浸湿饱和,注意水面不要高出试样的顶面。待饱和后关进水开关再装下层。

(3) 如此继续分层装入试样并饱和,直至试样超过上部测压孔 2cm 为止。在试样的最上部放一层厚 2~3cm 的砾石层作为缓冲层,以防供水时冲刷土样。

3. 查平、调试

(1) 待最后一层试样饱和后,继续使水位缓缓上升至溢水孔,当有水溢出时,关进水开关。

(2) 静置数分钟后,检查各测压管水位是否与溢水孔齐平,如不齐平,说明试样中或测压管接头处有集气阻隔需排出。

(3) 排气泡的方法是将测压板倾斜,使管内水位低于金属筒内水位,以重力水推气泡出来;当气泡停在管的弯曲部位时,将测压管上部抬起,用水对气的浮力将气泡排出。

4. 水流渗透

调节供水装置(水位调节器),使其水位在试样上部的一定高度处,打开进水开关水即从试样底部向上渗透,经溢水管流出,此时应注意让供水瓶(供水箱)溢水管始终溢水,以此保持金属圆筒内水面不变。

5. 观测

当测压管水位稳定后(在 5s 内测压管水位变动不超过 0.5mm 或以两次所测流量的差小于 5% 为准)。记录测压管水位值(读弯月面下缘,估读到 0.1cm)。在各测压管之间,由于具有一定的渗透路径,存在一定的水头损失,但由于渗透路径相同,物质均一,因此水头差应相同。

测量、记录渗流时间 $t(s)$, 渗流体积 V , 即经溢水管流出的水量 V , 计算单位时间内渗流量 $Q = \frac{V}{t}$ 。并将观测数据记入表 1-2-1。

6. 再次渗透

调节供水装置,使其水位位于试样上部的另一高度处,变更水力坡度,重复以上观测。一般调节三次水头,观测三次即可。注意调节水头的高度要依次下降,或依次上升,但最低不得低于

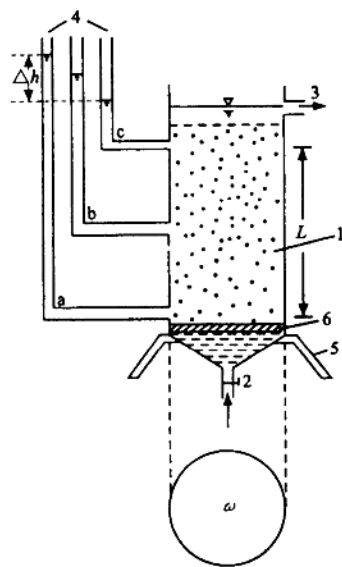


图 1-2-1 达西仪结构示意图

1—试样;2—进水开关(进水管通过胶管与供水装置相连);3—溢水管;4—测压孔(通过胶管与测压板上的玻璃管连接);5—仪器架;6—金属网

试样顶部的水位。

更换不同粒径的试样,重复以上实验。

四、资料整理

1. 提交实验报告表(表 1-2-1)。

2. 绘制 $Q-I$ (或 $v-I$) 关系曲线。

将三次观测得出的三个流量值(或流速值)放在纵坐标,将相对应的三个水力坡度值放在横坐标,连结坐标内的三点看其是否成一直线。如果成一直线,试回答说明了什么。

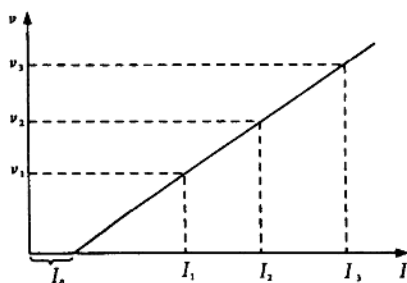


图 1-2-2 $v-I$ 关系曲线

思考题:

1. 为什么要在测压管水位稳定后测量流量?

2. 比较不同试样的 K 值,分析影响渗透系数 K 值的因素。

表 1-2-1 达西渗流实验报告表

仪器编号 _____ 过水断面面积(ω) _____ cm^2 渗透途径(L) _____ cm 水温 _____ $^{\circ}\text{C}$

土样名称	实验次数	水力梯度(I)				渗透流速(v)				渗透系数(K)		备 注
		测压管水头			水力梯度 $I = \frac{\Delta H}{L}$	渗流时间 t	渗流体积 V	渗透流量 $Q = \frac{V}{t}$	渗透流速 $v = \frac{Q}{\omega}$	$K = \frac{v}{I}$		
		H_a	H_b	H_c								
		cm	cm	cm	cm	s	cm ³	cm ³ /s	cm/s	cm/s	m/d	
	1											
	2											
	3											
	4											
	5											
	1											
	2											
	3											
	4											
	5											
	1											
	2											
	3											
	4											
	5											

报告人 _____

实验日期 _____ 年 _____ 月 _____ 日

§ 1.3 观测土中水的毛细运动的实验

实验一 土的毛细上升高度的测定

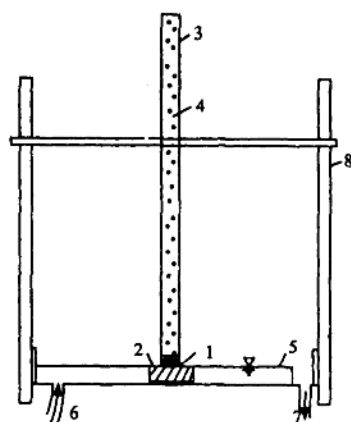
土中水的毛细现象是由于岩石分子和水分子之间的引力以及水分子之间的表面压力共同作用的结果。土的毛细上升高度是水在土的孔隙中因毛细作用而上升的最大高度。土中水的上升速度表征毛细上升快慢的程度。

控制土中毛细上升高度与速度的主要因素有：土的颗粒成分、孔隙度、结构、水温、矿化度、水化学成分、粘滞度及土的电化性质等。一般颗粒粗的毛细上升得快，颗粒细的上升的慢，但颗粒粗的毛细上升高度不如颗粒细的毛细上升高度大。但应指出，由于土颗粒间的孔隙形状与大小极不一致，故土中的毛细现象比柱形毛细管中的要复杂很多。

对土的毛细上升高度的研究，目的在于提供盐碱土壤改良、公路及铁路路基、基础工程的设计资料或借以判断地下水对于灌溉的影响及冰冻作用之危害程度等。

一、实验装置、仪器及用品

1. 实验装置如图 1-3-1。
2. 底部包铜丝网的玻璃管(长 50 ~ 100cm) 三根，管上标有刻度。
3. 砂样：
 - ① 粗砂 粒径 0.6 ~ 0.9mm
 - ② 中砂 粒径 0.25 ~ 0.45mm
 - ③ 细砂 粒径 0.10 ~ 0.25mm
4. 秒表、方格纸、玻璃杯、烘箱、捣棒等。



二、实验步骤

1. 装样：将欲测砂样经漏斗倾入玻璃管中，每装入 2 ~ 3cm 高度以捣棒轻捣之。

图 1-3-1 观测砂土中水的毛细上升高度实验装置图
1-铜丝网；2-透水石；3-玻璃管；4-砂样；5-水槽；6-进水管；7-溢水管；8-支架

2. 观测：将装有试样的玻璃管放入水槽内的透水石上，使玻璃管的下端紧贴水面(如图 1-3-1)，同时起动秒表。

3. 观测记录：将不同毛细上升高度及其对应的时间，填入表 1-3-1。初期每上升 1cm 观测一次时间；2min 后每上升 0.5cm 观测一次时间。总之，初期观测频率应尽可能密，后期适当变疏。直至毛细上升高度稳定为止。上升稳定时的最大高度即为该砂土的毛细上升高度。

重复以上步骤，做另外两种不同粒径的试样。

三、实验成果

1. 完成表 1-3-1 砂土中水的毛细上升高度实验报告表。
2. 在同一坐标系内分别做出三种砂样的毛细上升高度(以厘米为单位)与时间(以秒为单位)的关系曲线。

思考题：

1. 土的毛细上升高度, 上升速度与粒径大小有何关系?
2. 比较实验得出的三种砂样的毛细上升高度与时间的关系曲线。指出初期及后期三种砂样的毛细上升速度自大而小的顺序, 并分析其原因。

表 1-3-1 砂土中水的毛细上升高度实验报告表

[illegible]

实验二 毛细水传递静水压力的测定

一、实验目的

证明吸湿水、薄膜水不受重力支配,不传递静水压力,而毛细水受毛细力及重力支配并传递静水压力。

二、实验仪器、用品

1. 长玻璃管一个(长 30cm),带铜丝网或纱布。
2. 短玻璃管一个(长 10cm),带铜丝网或纱布。
3. 玻璃水槽和支架。

4. 内盛颜色水的烧杯。

三、实验步骤

1. 取一支 10cm 长玻璃管,使其高度小于欲测试样的毛细上升高度(本次实验采用粒径 0.5 ~ 1.0mm 的砂)。然后在管中均匀密实装填 8cm 高砂样,将短管垂直地缓慢地浸入颜色水中,使试样为毛细水饱和后提起,观察短管是否滴水。在砂样面上加水 10mL,记下管下端流出水量,并记下管上端自由水面消失的时间和管下端停止出流时间的关系,说明其理由。

2. 取一支长 30cm 的玻璃管,装填和短管同一砂样,浸入水槽中,待其毛细上升高度稳定后提出,使重力水滴出。然后,在试样面上加 20mL 水,同样观察管下流出水量,管上水面消失与管下开始出流时间的关系,就记录结果说明其理由。

3. 将以上所用短管填满同样砂样,用颜色水以同上方法饱和后提起,看是否滴水。然后使长短两管相接,短管在下,长管在上,使成一砂柱(如图 1-3-2),接触处应紧密,使无空气存在。接好后,观察管下端水流情况及短管颜色变化情况。

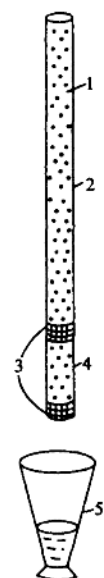


图 1-3-2 观测砂土饱和和毛细带水运移的装置图
1 - 砂样;2 - 长管;3 - 铜丝网;4 - 短管;5 - 量杯

思考题:

1. 短管两次装填砂样,饱水提出后,下端是否有水滴出?为什么?
2. 长短管相接后是否有水滴出?为什么?短管颜色有何变化?
3. 短管砂样上面加水,是否下端立刻有水滴出?为什么?