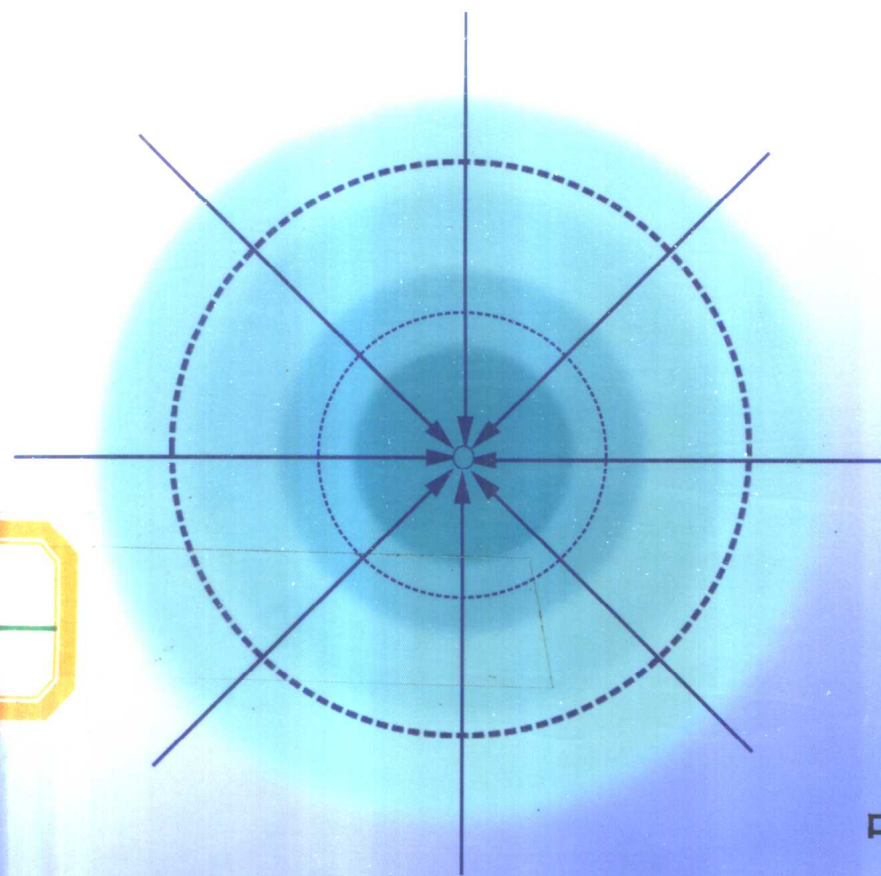


工程渗流力学 及应用

苑莲菊 李振栓 武胜忠 杨展 赵志怀 编著



中国建材工业出版社

工程渗流力学及应用

苑莲菊 李振栓 武胜忠 杨展 赵志怀 编著

中国建材工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

工程渗流力学及应用/苑莲菊等编著. —北京: 中国建材工业出版社, 2001.6

ISBN 7 - 80159 - 075 - 9

I. 工… II. 苑… III. 工程力学: 渗流力学

IV. TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 22859 号

工程渗流力学及应用

苑莲菊 李振栓 武胜忠 杨展 赵志怀 编著

*

中国建材工业出版社出版

(北京海淀区三里河路 11 号 邮编: 100831)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京丽源印刷厂印刷

*

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 28.625 字数: 733 千字

2001 年 7 月第一版 2001 年 7 月第一次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 51.00 元

ISBN 7 - 80159 - 075 - 9/N·001

前 言

从20世纪初开始,渗流对工程的影响以及工程对环境的影响已为工程界广泛重视。许多工程技术人员及学者从工程实践和理论两方面进行了大量的研究,并获得了许多有价值的成果,既解决了工程中的实际问题,又丰富和发展了渗流理论,它已成为许多基础学科,如水力学、土力学、岩石力学、工程地质学、水文地质学以及环境学等不可缺少的重要组成部分。同时它也是许多应用学科,如水工结构、农田水利、地下水供水工程、矿业工程、岩土工程和基础工程的重要理论基础。

随着相关学科的不断发展和完善,各类工程实践中提出的渗流问题日益广泛和复杂。伴随着实验方法的逐渐改进,以及计算机在渗流计算中的普遍应用,渗流逐步形成具有自己的理论、研究方法和应用范围的独立学科。同时,在国内外相继问世许多关于渗流问题方面的专著,如岩土水力学、地下水力学、渗流力学、地下水动力学和多孔介质中流体动力学等。这些专著从不同目的或不同角度研究渗流问题,为渗流学科的发展、完善和系统化作出了重要的贡献。

当代人类工程活动与20世纪初相比,类型逐渐增多,活动空间不断扩大,出现的工程渗流问题和工程诱发的环境渗流问题越来越多,越来越复杂,所造成的各方面损失也越来越严重。主要表现在:

(1) 在水利工程中,闸坝渗漏损失引起工程效益下降,下游浸没;土坝中渗流作用引起的冲蚀和滑坡等破坏;渗透破坏和渗透变形导致垮坝等。

(2) 在建筑工程中,渗流引起的基坑边坡失稳;基坑支护结构的破坏;基坑降水;基坑涌水造成的淹没;地基处理;渗透变形和破坏以及引起的周围土体移动,引发的地面建筑和地下设施破坏。

(3) 在采矿工程中,矿坑突水造成的矿井淹没;矿山排水设计;矿山排水造成的塌陷。

(4) 在农业工程中,灌渠渗漏造成的工程效益下降;灌渠渗漏和灌溉渗入引起的土地湿化、盐碱化;农田排水工程设计和盐碱地改良。

(5) 与渗流有关的环境问题,地震引起的沙土液化;水库蓄水诱发的地震;大量抽取地下水或开采液体矿产引起的地面沉降。

从以上各类工程和环境中的大量渗流问题中,可以看出渗流是工程设计、施工以及安全使用的重要因素,也是评价工程的社会效益、经济效益和环境效益的重要内容。

解决各类工程中诸多的渗流问题和渗流引起的环境问题必须依据渗流的基本理论和方法,这就是工程渗流力学的主要任务。

本书共分十章,主要阐述渗流问题的解析解。第一章阐述渗流的基本概念、基本定律以及基本方程;第二章介绍天然渗流问题;第三章论述了在集水建筑物中渗流的基本理论和基本公式;第四章、第五章介绍工程渗流问题的数值计算方法和物理模拟实验方法;第六章~第九章分别研究水利工程、建筑工程、采矿工程以及农业工程中所出现的渗流问题及其防治或处理方法;第十章介绍了与渗流有关的环境问题。本书为水利工程、建筑工程、岩土工

程、采矿工程、道路工程、环境工程、农业工程等专业高年级本科生、研究生的教材；也可供从事水利工程、建筑工程、岩土工程、采矿工程、道路工程、环境工程、农业工程设计人员在设计、施工、监理时使用。

鉴于工程渗流力学属于边缘学科，是在许多学科领域的基础上发展起来的，而每个学科在研究渗流问题时都形成各自的习惯用语和符号，为此我们在撰写过程中，对基本理论阐述时，用词和符号尽量统一；在撰写具体工程渗流问题时，仍然沿用不同工程中习惯用语和符号，以便于使用，凡此都在文中加以说明。

本书中除阐述作者的观点外，还引用了有关著作中的经典论述和最新的研究成果，在此向他们表示感谢。因作者水平有限，且国内还未见正式出版工程渗流专著，所以书中难免存在许多错误，敬请同行和读者给予批评、指正。

作 者
2001年5月

目 录

第一章 渗流理论基础	(1)
第一节 渗流基本概念.....	(1)
第二节 渗流基本定律	(14)
第三节 岩石介质按渗透性能分类及渗透系数张量	(20)
第四节 渗流在非均质介质中的折射定律及等效渗透系数	(22)
第五节 流网	(25)
第六节 渗流基本方程	(33)
第七节 描述渗流问题的数学模型及其解法	(42)
第八节 非饱和流动	(45)
第二章 天然渗流计算	(58)
第一节 天然渗流的稳定运动	(58)
第二节 地表水体附近的潜水非稳定流	(65)
第三节 面状入渗潜水非稳定流	(71)
第三章 集水建筑物附近的渗流计算	(75)
第一节 概述	(75)
第二节 稳定的完整井流	(76)
第三节 非稳定的完整井流	(95)
第四节 回灌井.....	(119)
第五节 边界附近井流计算.....	(120)
第六节 不完整井流.....	(128)
第七节 多井系统.....	(134)
第八节 测定岩石介质参数的野外试验方法.....	(139)
第九节 水平集水建筑物的渗流计算.....	(146)
第四章 研究渗流问题的数值模拟方法	(153)
第一节 概述.....	(153)
第二节 有限差分法.....	(153)
第三节 有限单元法.....	(161)
第四节 边界单元法.....	(175)
第五章 工程渗流物理模拟	(184)
第一节 渗流槽模拟实验.....	(184)
第二节 连续介质的电模拟方法 (水电比拟实验)	(187)
第三节 稳定渗流的电阻网模拟实验.....	(192)
第四节 非稳定渗流的网络模拟实验.....	(197)
第六章 水利水电工程中的渗流问题	(205)

第一节	概述	(205)
第二节	闸坝地基渗流计算	(207)
第三节	土坝渗流计算	(229)
第四节	绕坝渗流计算	(238)
第五节	库岸渗失量计算	(242)
第六节	潜水回水计算	(246)
第七节	土的渗透变形(或渗透破坏)及防治	(251)
第七章	建筑工程中的渗流问题	(262)
第一节	地基处理工程中的渗流问题	(262)
第二节	基坑降水渗流问题	(283)
第三节	渗流对建筑基坑稳定性的影响	(304)
第八章	农业工程中的渗流问题	(329)
第一节	概述	(329)
第二节	灌溉渠道渗漏计算	(330)
第三节	排水工程渗流计算	(339)
第九章	矿业开采工程中的渗流问题	(350)
第一节	概述	(350)
第二节	矿坑涌水量预测	(350)
第三节	井巷突水及预测	(373)
第四节	矿井水的防治	(382)
第十章	与渗流有关的环境问题	(383)
第一节	水库蓄水诱发地震	(383)
第二节	抽水引起的地面沉降	(392)
第三节	区域性土的液化	(416)
附表 1	$W(u)$数值表	(427)
附表 2a	潜水完整井 A 组标准曲线 s_d 数值表(据纽曼)	(431)
附表 2b	潜水完整井 B 组标准曲线 s_d 数值表(据纽曼)	(433)
附表 3	$W(u, r/B)$数值表	(435)
附表 4	虚宗量零阶第二类贝塞尔函数 $K_0(x)$	(438)
附表 5	$e^x, K_0(x), e^x K_0(x), W(x), e^x W(x)$函数表(据汉图什)	(441)
附表 6	第一类全椭圆积分数值	(446)
附表 7	第一类不完全椭圆积分(F)数值	(447)
附表 8	第二类全椭圆积分数值	(449)
	参考文献	(450)

第一章 渗流理论基础

第一节 渗流基本概念

一、含水层、多孔介质，地下水，渗流

(一) 含水层、多孔介质

我们知道，地下水贮存在岩层空隙中，并在其中运动着。通常把含有水，并能允许大量水通过的岩层称为含水层；反之，不允许水通过的岩层又称为隔水层。有的岩层如粘土，虽然含水，但不能允许水通过，一般情况下把粘土也当成隔水层。介于含水层与隔水层之间的透水性较差，其中流体运动速度滞缓的岩层又称为弱透水层等。

因为水是贮存并运动在岩层的空隙中，在渗流力学中，我们把这样的岩层又称为多孔介质。

关于多孔介质，Bear 定义为：首先认为多孔介质是“带有孔洞的固体”，并且有以下特点：

(1) 多相物质所占据的一部分空间。在多相物质中至少有一相不是固体，它们可能是气相和（或）液相。固相称为骨架。在多孔介质范围内没有固体骨架的那一部分空间叫空隙空间或孔隙空间。

(2) 在多孔介质所占据的范围内，固相应遍及整个多孔介质，在每个表征体之中必须存在固体颗粒。多孔介质的一个基本特点是固体骨架的比表面积较大；构成空隙空间的空隙比较狭窄。

(3) 至少构成空隙空间的某些孔洞应当相互连通。

从上述特点或定义看出，含有孔隙水的松散沉积物，含有裂隙水的遍布于整个含水层细小的节理、裂隙及含有岩溶水的一些微小溶洞、溶孔等都看成多孔介质。这是渗流力学研究的内容之一。

(二) 地下水

广义地下水定义：是指埋藏在地面以下岩石空隙中的水；狭义地下水定义：是指潜水面以下的重力水，也就是通常对地下水的定义。

按地下水在地面以下的垂直分布，可概括为两个带：非饱和带（即包气带）和饱和带，如图 1-1。非饱和带通常又由三部分组成：上部土壤水带，中间过渡渗水带和毛管水带；

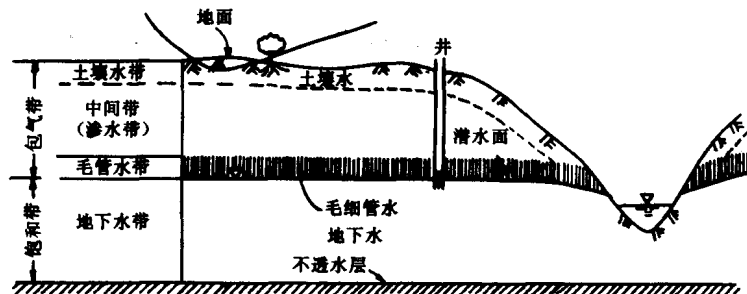


图 1-1 地面以下水的分布

饱和带位于潜水面以下，这部分又称地下水带，主要由重力水组成，所以也叫重力水带。

就地下水存在的形式，又可分为结合水、薄膜水、毛细水、重力水。在工程渗流力学中，饱和带中的重力水和部分非饱和带中的毛管水、薄膜水等，为主要研究对象。

(三) 渗流

地下水在多孔介质中运动，由于多孔介质中孔隙、裂隙大小、形状很复杂，地下水质点在其中运动毫无规律，有些地方甚至不连续，所以研究地下水就不能像研究地表水一样直接研究水质点的运动，而只能用统计方法，忽略个别质点的运动，来研究具有平均性质的运动规律。

所谓统计方法，其实就是一种假想水流代替在多孔介质中运动着的真实流体，以通过对假想水流的研究，来达到了解真实水流体平均运动规律的目的。这种假想水流，一方面认为它是连续地充满整个介质空间（包括空隙空间及骨架占据的空间）。另一方面，认为它通过水断面的流量与真实水通过该断面的流量相同；它在断面上的水头及压力与真实水流的水头和压力相等；它在多孔介质中运动时所受的阻力等于真实水流所受的阻力。满足这些条件的假想水流称为渗流。我们把渗流所占据的空间称为渗流场，描述渗流的参数又称为渗流运动要素，如压力 P 、速度 v 及水头 H 等等。

有了渗流这个概念，我们就可把多孔介质中的流体当成连续流体研究，这就可以避免研究个别空隙中液体质点渗透规律的困难，运用数学这个工具，并继承水力学及流体力学已经成熟的方法；同时研究结果也不失去真实水流的特性。

二、流体与多孔介质的性质

(一) 流体的物理性质

1. 密度、重度、比重

流体与其他物体一样，具有质量。单位体积内具有的质量称为密度，以 ρ 表示，量纲为 $[ML^{-3}]$ 。一般来说流体密度是随压力 (P) 和温度 (T) 的变化而变化的，即

$$\rho = \rho(P, T) \quad (1-1)$$

我们把单位体积的重量称为重度，以 γ 表示

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (1-2)$$

重度的量纲为 $[FL^{-3}]$ 或 $[M^2L^{-2}T^{-2}]$ 。

在工程中，有时用到比重 (G) 的概念，或称相对密度 (δ)。液体比重的定义为 4℃ 时液体的密度和纯水密度之比。

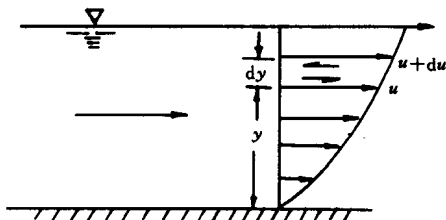


图 1-2 粘滞性示意图

2. 流体的粘度

流体不同于固体，只要施加切应力流体就会连续变形。我们通常把这种连续变形称为“流动”，而把流体阻止任何变形的性质叫粘滞性。

流体的粘滞性可由图 1-2 说明。液体沿着一固体平面壁作平行直线运动。由于液体具有粘滞性的缘故，靠近壁面附近流速较小，远离壁面处流速较大，因而各个不同液层的流速大小就不相同。设距固体边界为 y 处的流速为 u ，在相邻的 $y + dy$ 处流速为 $u + du$ ；由于两相邻液层的流速不同（也就是存在着相对运动），在两流层之间将成对地产生切应力，也称为内摩阻力。1686 年 Newton 通过实验证明，相邻层接触面

上所产生的内摩阻力 F 的大小除了与液体本身的性质有关外，与两液层流速梯度和接触面积成正比。可用下式表示：

$$F = \mu \cdot A \cdot \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

单位面积上的内摩阻力，即切应力为：

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

公式(1-3)、(1-4)即称为牛顿内摩擦定律。式中 μ 为动力粘滞系数，其量纲为 $[ML^{-1}T^{-1}]$ ，常用单位 $Pa \cdot s$ 。

μ 值与液体的种类有关，液体的性质对摩擦力的影响，通过 μ 来反映，粘性大的 μ 值大，粘性小的 μ 值小。

液体的粘滞性还可以用另一种形式表示：

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

因为 ν 不包括力的量纲，故称 ν 为运动粘滞系数，量纲为 $[LT^{-1}]$ ，常用单位为 cm^2/s 或 m^2/s 。

在同一种液体中 μ 或 ν 均随温度和压力而异，但随压力变化甚微，对温度很敏感。对于运动粘滞系数 ν 可以按下列经验公式计算：

$$\nu = \frac{0.01775}{1 + 0.0337t + 0.000221t^2} \quad (1-6)$$

式中 t ——水温 ($^{\circ}C$)。

为了工程上使用方便，表 1-1 列出不同温度时水的 ν 值。

不同温度时运动粘滞系数 ν 值

表 1-1

温度 ($^{\circ}C$)	ν (cm^2/s)	温度 ($^{\circ}C$)	ν (cm^2/s)	温度 ($^{\circ}C$)	ν (cm^2/s)
0	0.01775	16	0.01118	35	0.00725
2	0.01674	18	0.01062	40	0.00659
4	0.01568	20	0.01010	45	0.00603
6	0.01473	22	0.00989	50	0.00556
8	0.01387	24	0.00919	55	0.00515
10	0.01310	26	0.00877	60	0.00478
12	0.01239	28	0.00839		
14	0.01176	30	0.00803		

应当指出，牛顿内摩擦定律只适用一般流体，对一些特殊流体是不适用的。一般把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体，反之称为非牛顿流体，如图 1-3。图中直线 A 称为牛顿流体，B、C、D 线称为非牛顿流体，而在工程渗流力学中，一般研究的均为牛顿流体。

最后强调说明，粘滞性只对运动着的流体而言，当液体处于静止或平衡状态时，粘滞性不起作用。

3. 压缩性

液体不能承受拉力，但可以承受压力。液体受压后

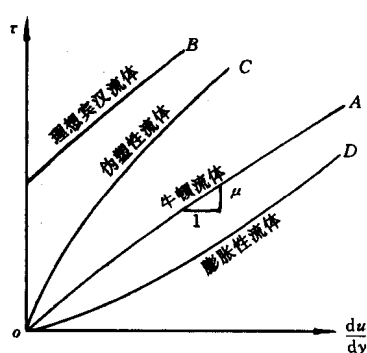


图 1-3

体积要缩小，这种性质称为压缩性。液体的压缩性大小是以体积压缩系数 β 或体积弹性系数 E 来表示。

体积压缩系数 β 是指液体体积相对缩小值与压强之比。若某一液体在承受压强为 p 的情况下，体积为 V ，当压强增加 dp 后，体积变化值为 dV ，其体积压缩系数为：

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-7)$$

式中的负号表示压强增大，体积缩小。

又因为液体压缩时其质量不变，故有：

$$dm = \rho dV + V d\rho = 0$$

所以
$$\frac{dV}{V} = -\frac{d\rho}{\rho}$$

因而，体积压缩系数又可写作

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1-8)$$

所谓体积弹性系数 E ($E = \text{应力}/\text{应变}$)，即为压缩系数的倒数： $E = 1/\beta$ 。

由 (1-7)、(1-8) 式看出，当压强由 p_0 变到 p ，液体的体积由 V_0 变到 V ，则有：

$$\int_{V_0}^V \frac{dV}{V} = -\beta \int_{p_0}^p dp$$

积分后可得如下的状态方程

$$V = V_0 e^{-\beta(p-p_0)} \quad (1-9)$$

同理可得

$$\rho = \rho_0 e^{\beta(p-p_0)} \quad (1-10)$$

将上二式用泰勒级数展开，取前二项，可以进一步简化为

$$V = V_0 [1 - \beta(p - p_0)] \quad (1-11)$$

$$\rho = \rho_0 [1 + \beta(p - p_0)] \quad (1-12)$$

以上两个方程为液体的状态方程，它能描述大多数液体的性状。液体种类不同，其 β 和 E 也不同，对同种液体来说一般将 β 和 E 视为常数。

水的压缩性很小，在 20°C 时，水体积弹性系数 $E \approx 2.1 \times 10^5 \text{N/cm}^2$ ，也就是说每增加一个大气压，水体积相对压缩量值约为 $1/20000$ ，因此，在工程上视为水是不可压缩的。

4. 表面张力

当液体与另一种物质（气体）相接触时，在它们之间存在一种自由界面能，这种界面能是由于各相内部的分子与接触面处的分子间向内的引力差引起的。若具有自由能的表面可以收缩，则自由界面能就以界面张力的形式表现出来，也称表面张力。

表面张力是指自由表面上液体分子，因受邻近质点分子引力作用，被拉向液体内部，使自由表面上液体分子受到极其微小的拉力，用 σ 表示，单位一般采用 N/m 。不同液体 σ 值是不同的，同一种液体 σ 值随温度升高而减小。

表面张力仅在自由表面存在，液体内部没有，所以它只是一种局部现象，在一般工程计算中常被忽略。但在某些情况如研究非饱和带中水分运动，表面张力就是一个很重要的因素。毛细现象就是表面张力作用的结果，可用下面的实验证明：

我们把细玻璃管插入盛有水或水银的容器中，管内液体借毛细管作用（即表面张力）上升

或下降，如图 1-4，毛管上升高度值 h 的大小与管径大小及液体性质有关。管内径愈小，毛管上升值就愈大。这种现象称为毛管现象。毛管现象及表面张力对研究非饱和渗流是有重要意义的。

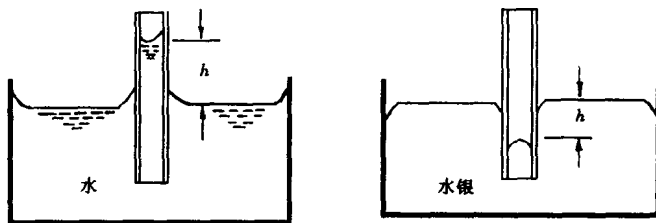


图 1-4

(二) 多孔介质的性质

上述对多孔介质中的流体性质做了介绍，从工程的角度有必要对多孔介质本身的几何性质做些描述。

1. 多孔介质的孔隙性

多孔介质是“带有孔洞的物体”，所以它具有孔隙性。在工程上常用孔隙率 n 和孔隙比 e 来表示。

孔隙率（度）是指孔隙的体积 V_v 与多孔介质总体积 V_b （包括孔隙体积和固体颗粒所占据的体积）之比：

$$n = \frac{V_v}{V_b} \times 100\% \quad (1-13)$$

孔隙比 e 指孔隙的体积 V_v 与固体颗粒体积 V_s 之比：

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1-14)$$

孔隙比和孔隙率（度）都是用以表征孔隙性质的参数，不难证明两者之间可以有下列关系：

$$n = \frac{e}{1+e} \times 100\%$$

$$e = \frac{n(\%)}{100 - n(\%)}; \quad e = \frac{n}{1-n} \quad (1-15)$$

孔隙率或孔隙比大小取决于多孔介质中骨架的粒径分布和孔径分布。除此之外还与土颗粒的组成，不均匀系数有关，也与颗粒的排列形状有关，如图 1-5、图 1-6。此外，它还受多孔介质中的固结物质及沉积环境因素的影响。

一般天然土 n 多为 30% ~ 40% 左右，表 1-2 表示几种天然沉积物的孔隙率的典型值。

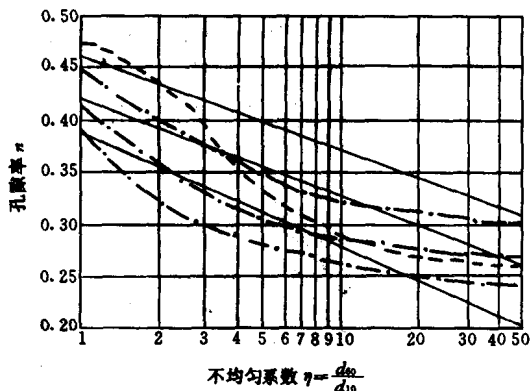


图 1-5 孔隙率与不均匀系数的关系
 - - - 为松散、中等、密实三种情况；
 - - - 为天然情况；— 为破碎料、砂砾

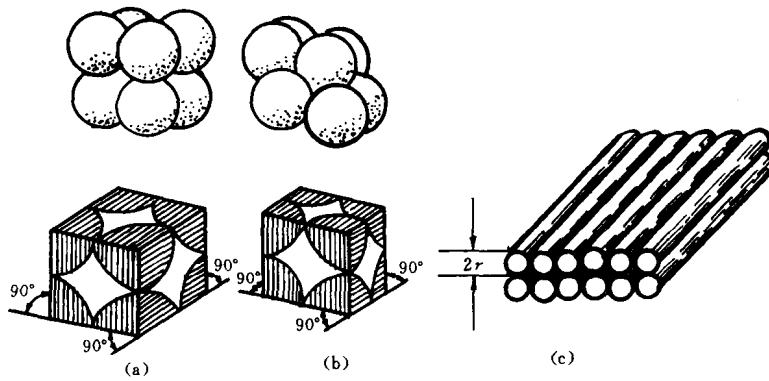


图 1-6 典型的有序多孔介质结构及相应的孔隙率 (据 Bear)

(a) 等大圆球的立方体排列, $n = 47.64\%$; (b) 等大圆球的斜方六面体排列, $n = 25.96\%$;

(c) 等大圆棒的立方体排列, $n = \pi/4$

然而, 从流体通过多孔介质的观点, 只有那些相互连通的孔隙才有意义, 和其他孔隙不相连通的孤立的孔隙是无效的。对于细粒土, 如一些粘性土, 因为颗粒表面的结合水占据了相当一部分空隙, 所以对流体运动的有效孔隙要比总的孔隙少得多。我们把互相连通的、不为结合水所占据的那一部分孔隙称为有效孔隙 $(V_v)_e$ 。有效孔隙体积与总体积之比称为有效孔隙度 n_e , 即:

$$n_e = \frac{(V_v)_e}{V_b} \quad (1-16)$$

几种天然沉积物的孔隙率的典型数值*

表 1-2

沉积物	孔隙率 (%)	沉积物	孔隙率 (%)
泥炭土	60~80	中细粒混合砂	30~35
土壤	50~60	砾石	30~40
粘土	45~55	砂砾石	30~35
粉砂	40~50	砂岩	10~20
中粗粒混合砂	35~40	页岩	1~10
均质砂	30~40	石灰岩	1~10

* 据 Todd 1959

在本书以后的叙述中, 孔隙度都是指有效孔隙率。

应当说明, 还有一种孔隙称为死端孔隙或滞流孔隙, 如图 1-7, 它看上去属于相互连通的一类孔隙, 但对流动几乎不起作用。因而从地下水运动角度来看, 这类孔隙是无效的。

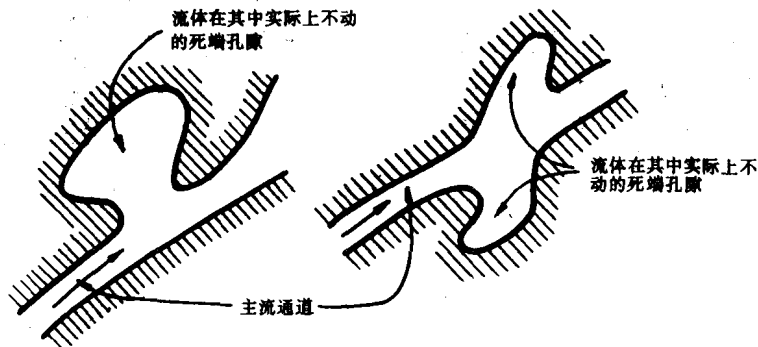


图 1-7 死端孔隙

然而其中水在疏干时能排出，所以对排水而言是有效的，这时的有效孔隙率也称为给水度。

2. 多孔介质的压缩性

在天然条件下，一定体积的多孔介质，总要承受上覆岩层荷重的压力。在压应力的作用下，多孔介质可表现出压缩性。下面以承压含水层的受力情况来说明。

假设含水层的粒间无粘聚力。在含水层中切一面积 $A=1$ 的水平横截面，其中 λA 的面积为颗粒与颗粒的接触面， $(1-\lambda)A$ 为水和颗粒接触面积，如图 1-8。

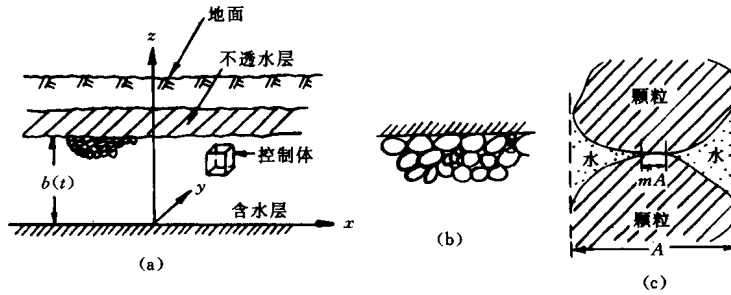


图 1-8 可压缩承压含水层

按 Terzaghi 的观点，作用在该平面上的上覆总的压力 σ ，应由颗粒骨架和孔隙中的水来承担，即：

$$\sigma = \lambda \sigma_s + (1 - \lambda) p \quad (1-17)$$

式中 σ ——上覆荷重引起的总应力；

σ_s ——作用在骨架颗粒上的粒间应力；

p ——孔隙水压力，且 $p = \gamma \cdot H$ 。

λ 值实际很小 ($\lambda \ll 1$)，然而 σ_s 值却很大，大约等于该面上固体的屈服应力。Terzaghi 把 $\lambda \sigma_s = \sigma'$ 称为固体骨架的有效应力，由于水中 $(1-\lambda) p \approx p$ ，所以上式就可以写成

$$\sigma = \sigma' + p \quad (1-18)$$

(1-18) 式即土力学中的有效应力原理。

从土力学可知，岩土的变形（压缩）与孔隙度的变化都只取决于有效应力 σ' 的变化。因为孔隙水压力 p 是个中性应力。但当 σ 为常数时，孔隙水压力改变将会直接引起有效应力的改变。如式 (1-18)，若在承压含水层中抽水，水头下降 ΔH ，由于上覆的荷重不变，故有：

$$\sigma = (p - \gamma \Delta H) + (\sigma' + \gamma \Delta H)$$

即作用在骨架上的有效应力增加 $\gamma \Delta H$ ，因此使多孔介质压缩。

多孔介质的压缩性，可以用多孔介质的压缩系数 α 表示。设作用在该介质的表面压强为 p ，如果压强增加，要引起多孔介质的压缩，可写出下面的表达式：

$$\alpha = - \frac{1}{V_b} \cdot \frac{dV_b}{dp} \quad (1-19)$$

式中 α ——多孔介质的压缩系数；

V_b ——多孔介质中所取的单元总体积， $V_b = V_s + V_v$ ；

V_s ——单元体中固体骨架体积；

V_v ——单元体中孔隙体积。

故：

$$\frac{dV_b}{dp} = \frac{dV_s}{dp} + \frac{dV_v}{dp}$$

式中, $V_s = (1-n)V_b$; $V_v = n \cdot V_b$ 。

将其代入 (1-19) 式得

$$\alpha = -\frac{1}{V_b} \cdot \frac{dV_s}{dp} - \frac{1}{V_b} \cdot \frac{dV_v}{dp} = -\frac{1-n}{V_s} \cdot \frac{dV_s}{dp} - \frac{n}{V_v} \cdot \frac{dV_v}{dp}$$

令 $\alpha_s = -\frac{1}{V_s} \cdot \frac{dV_s}{dp}$; $\alpha_p = -\frac{1}{V_v} \cdot \frac{dV_v}{dp}$, 则有:

$$\alpha = (1-n)\alpha_s + n \cdot \alpha_p \quad (1-20)$$

式中 α_s ——骨架的压缩系数, 表示固体颗粒的压缩性;

α_p ——孔隙压缩系数, 表示孔隙的压缩性。

固体骨架本身的压缩性远远小于孔隙压缩性, 即 $(1-n)\alpha_s \ll n\alpha_p$, 故有:

$$\alpha \approx n\alpha_p \quad (1-21)$$

式 (1-21) 说明, 多孔介质的压缩性实质上是在有效应力作用下引起的孔隙体积的压缩。因此, 在一般情况下, 多孔介质又表现出弹性, 即上覆荷重减小, 或孔隙水压力增大时, 孔隙率又可以恢复。但在极端压密的压力下, 多孔介质就会表现出不可逆的变化, 这是由于骨架发生变形和破坏, 这是不能恢复的。

三、渗流的作用力

渗流不仅对于某一接触面作用有压力或浮力, 而且颗粒骨架本身也受到孔隙水流的浮力和拖曳力作用。因此, 渗流对介质的作用力除了研究整体介质四周表面所受压力外, 还须进一步研究骨架之间的孔隙水作用力, 以及它们之间的转化关系。下面分别说明。

(一) 岩土体接触面上静水压力分布

从流体的静力学可知, 对于静止的连续介质或重力场中的均匀流动, 压力的变化满足:

$$-\frac{\partial p}{\partial z} = \gamma; \quad \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (1-22)$$

在均质流体中, 一般密度 ρ 为常数, 对于高度 $z_2 - z_1 = h > 0$, 则 $z + p/\gamma = \text{const}$ 或 $p_2 - p_1 = \gamma(z_1 - z_2)$, 如果高度 z_2 的自由表面上为大气压, 所以 $p_2 = 0$, 则有:

$$p \equiv p_1 = \gamma \cdot h \quad (1-23)$$

在饱和的多孔介质中如果方程 (1-22)、(1-23) 的变数在多孔介质的表征单元体上取平均值, 则这两个方程也成立。就是说, 在多孔介质中, 渗流对某一接触面上的静水压力, 服从流体的静水压力分布, 即任一点上的静水压力 $p = \gamma \cdot h$ 。

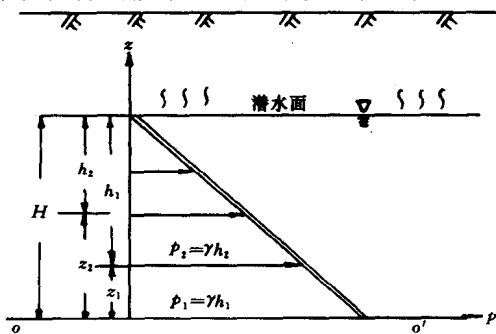


图 1-9

图 1-9 表示潜水位以下静水压力的分布。关于潜水位以上静水压力的分布在非饱和流中介绍。

(二) 骨架间渗流作用力

在饱和的多孔介质中, 地下水在孔隙中运动, 它对颗粒骨架的稳定性将发生破坏作用。地下水作用在颗粒表面上的力一般可概括为两部分: 一是垂直颗粒周界表面的水压力; 二是与颗粒表面相切的内摩阻力 (即切力)。这两

个力的合力 f_0 称为渗流作用力。该力作用在每个颗粒骨架上的大小和方向各不相同，如果考虑体积为 V 的土体，则可将其中各颗粒骨架所受的力 f_0 求和后再除以体积 V ，即可得单位土体中颗粒骨架所受的渗流作用力：

$$f = (\sum \bar{f}_0) / V \quad (1-24)$$

总单位渗流作用力是渗流力学中的一个基本问题，也是研究渗透变形问题（管涌、流土、淤填等）所必备的基本知识。另外，还可通过力的分析计算来分析土体或个别颗粒的稳定性。

1. 静水压力与浮力

固体颗粒淹没于水中，由于静水压力作用结果而产生浮力，使颗粒的重量减轻。同样对于一定体积的多孔介质只要孔隙彼此连通，并全部充满水时，由于各点的静水压力存在，故使多孔介质整体也将受到浮力，且等于各颗粒所受浮力的累加总和。按照阿基米德原理，单位体积多孔介质中颗粒所受浮力或上举力 f_1 ，应等于固体颗粒所排出同体积的水重，即 $f_1 = (1-n)\gamma_w$ ，此处 n 为多孔介质的孔隙率， γ_w 为水的重度。显然此时单位体积的多孔介质有效重量为实际重量减去所受的浮力，称为潜水重或浮重度 γ' 。如果以 γ_s 表示固体颗粒的重度，则其浮重度为：

$$\gamma' = (1-n)\gamma_s - (1-n)\gamma_w = (1-n)(\gamma_s - \gamma_w) \quad (1-25)$$

式中， $(1-n)\gamma_s$ 称之为土的干重度，以 γ_d 来表示，则上式又可表示为：

$$\gamma' = \gamma_d - (1-n)\gamma_w \quad (1-26)$$

如果我们不从单个颗粒来考虑，而是从多孔介质整体来考虑问题，也可以得到上式的结果。

应说明一点，这里所说的浮容重或潜水重，因为它直接由颗粒接触点传递压力，完全作用在介质骨架上而影响介质骨架结构变形故称为有效应力。另一部分压力为静止状态下孔隙中水压力，它是借助于粒间孔隙中的水传递压力，对介质骨架的结构形成，以及力学性质不发生影响，因此可以称为这种水的荷重为中性压力。饱和的多孔介质某剖面上的任一点总的应力也可以认为是由介质骨架间有效应力与孔隙水传递的中性压力两部分组成。即

$$\sigma = \sigma' + p$$

2. 动水压力与渗透力

在饱和的多孔介质中当出现水头差 ΔH 时，水就通过粒间孔隙流动，我们把这种促使流动的水头差称为驱动水头。

在渗流场中沿流线方向任取一个长为 dL 、截面积为 dA 的微分单元体，如图 1-10 所示，当地下水通过多孔介质流动时，作用在微分单元体上的力为：

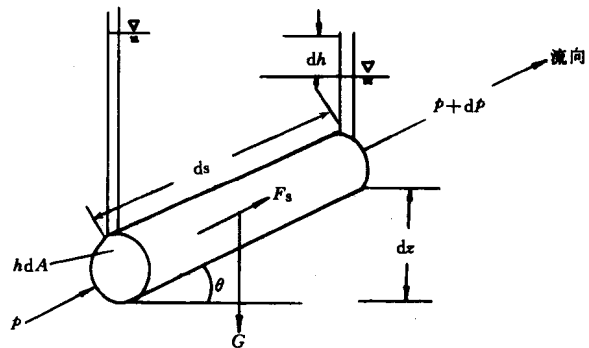


图 1-10 单位渗透力

(1) 单元体两端孔隙中水压力（表面力）。其差为：

$$-dp \cdot n \cdot dA = \gamma_w(-dh + dz)n \cdot dA$$

(2) 单元体孔隙中水的重力 G 在流线上的分力。即

$$- \gamma_w \cdot n \cdot dA \cdot dL \cdot \frac{dz}{dL}$$

(3) 地下水所受的阻力。即土颗粒骨架对孔隙水流摩擦阻力，其反力也就是水流作用于骨架的渗透力，它均匀地分布于微分单元体内。设 f_s 为单位体积多孔介质内孔隙中水所受到的阻力，则该微分单元体中水流受到沿流线方向总的阻力 F_s 为：

$$F_s = - f_s dA \cdot dL$$

除上述各力以外，还须考虑颗粒骨架承受水压力后再传递给地下水流的两个反力。

(4) 单元体两端颗粒截面上的水压力。其差值为：

$$- dp(1 - n)dA = \gamma_w(-dh + dz)(1 - n)dA$$

(5) 单元体受静水浮力，并以同样大小反作用于水体，在流线上的分力为：

$$- \gamma_w(1 - n)dA \cdot dL \cdot \frac{dz}{dL}$$

略去惯性力，上述诸力的和应等于零，则得单位体积多孔介质沿流线方向所受渗透力或单位渗透力 f_s ：

$$f_s = - \gamma_w \cdot \frac{dh}{dL} = \gamma_w \cdot J \quad (1-27)$$

式中 J ——水力坡降。

从上述推导可以看出渗透力是一种体积力，普遍作用到渗流场中所有的颗粒骨架上。

由此可知，渗透力是由水流的外力转化为均匀分布的内力或体积力，或者说由动水压力转化为体积力的结果。以上两个渗流的作用力，关系着土体的渗透稳定性，对于岩土体的渗透变形研究有重要意义。虽然静水压力所产生的浮力不直接破坏土体，但能使土体有效重量减轻，降低了抵抗破坏的能力，因而也是一个消极的破坏力。至于动水压力所产生的渗透力或渗流冲刷力，则是一个积极的破坏力，它与渗透破坏的程度成直接的比例关系。

3. 孔隙水压力

在土力学中及一些有关文献中经常遇到孔隙水压力的概念，在此做一归纳。

所谓孔隙水压力是指多孔介质的孔隙中充水的压力，一般包括无压渗流的静水压力和承压水的超静水压力；也相当于以上我们介绍的两个渗流作用力，即静水压力和动水压力，只是从不同的角度研究，应用于不同领域。孔隙水压力虽然不直接传递压力于骨架颗粒，而称为中性力，但却影响粒间应力变化。因而研究孔隙水压力对地面沉降、边坡稳定、渗透变形等均有重要意义。

四、渗透速度与实际速度

前面已经提到，渗流是充满整个岩石截面的假想水流。如果我们垂直于渗流方向取一个

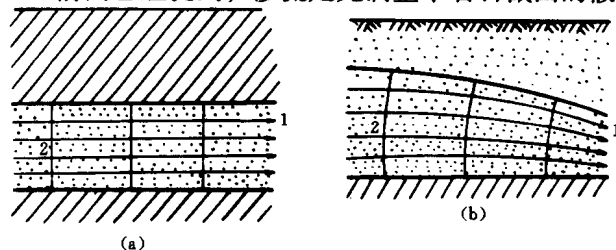


图 1-11 渗流过水断面

1—渗流方向（流线）；2—过水断面

岩石截面，称为过水断面。地下水计算中的过水断面的概念与水力学中的过水断面的概念是有差别的。地下水的过水断面是整个岩石的截面，既包括空隙面积也包括固体颗粒所占据的面积。当渗透平行流动时过水断面为平面，弯曲时则为曲面（图 1-11）。

设通过过水断面 A 有一个渗流量