
工程渗流理论 研究与实践

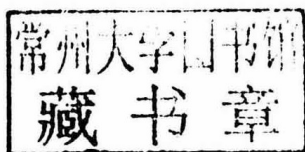
冯树荣 蒋中明 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

工程渗流理论 研究与实践

冯树荣 蒋中明 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书主要阐述了工程渗流力学的基本理论及其在水利、交通、油气地下储存及环境岩土工程中的应用。全书共 13 章, 包括: 渗流分析基础理论, 多场耦合渗流理论, 岩体高压渗透性试验, 岩体水力劈裂特性, 渗透变形的应力相关性, 高压水工隧洞非恒定渗流特性, 复杂坝基渗流特性分析, 重力坝坝基排水孔涌水量控制标准, 边坡饱和和非饱和渗流特性, 坝基及岸坡抬升变形研究, 高渗压岩体流固耦合效应, 岩体热流固耦合效应, 以及地下水封石油洞库相关渗流问题研究等。

本书可供从事水利、交通、油气地下储存及环境岩土工程渗流问题分析的科研和工程技术人员参考, 也可作为高等院校相关专业研究生教学参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

工程渗流理论研究与实践 / 冯树荣, 蒋中明著. --
北京: 中国水利水电出版社, 2018. 2
ISBN 978-7-5170-6322-3

I. ①工… II. ①冯… ②蒋… III. ①工程力学—渗
流力学—研究 IV. ①TB126

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第032241号

书 名	工程渗流理论研究与实践
作 者	GONGCHENG SHENLIU LILUN YANJIU YU SHIJIAN 冯树荣 蒋中明 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 14.25 印张 338 千字
版 次	2018 年 2 月第 1 版 2018 年 2 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	80.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

渗流引起的工程安全问题广泛存在于水利、土木、交通与环境工程等众多领域。渗流问题研究的最终目的是正确、合理地利用渗流理论，计算和分析渗流各要素对工程安全性的影响，提出合理的工程渗控措施，保障工程安全与正常运行，并合理控制工程造价。水利工程中坝基渗流控制是工程设计的关键技术之一，国内外因坝基渗流分析不到位、渗控措施不合理所引起的水库渗漏及渗透失稳案例并不鲜见；土木、水力、交通等领域中边坡失稳绝大多数与边坡中的渗流场改变直接相关；油气资源的大规模水封地下储存的关键技术也与地下水渗流状态息息相关。渗流理论研究及工程应用已成为相关行业科技人员越来越关注的重要课题之一。

本书作者之一冯树荣教授级高级工程师常年工作在水电设计与研究工作的第一线，主持过龙滩、向家坝等国家重大水电工程的设计工作，主持了国家科技支撑计划课题“石油储备地下水封洞库工程安全技术”等众多科技项目。在这些研究中，大量工程技术难题都与渗流相关。针对这些工程中的渗流问题，冯树荣教授级高级工程师与长沙理工大学的蒋中明教授合作，从渗流理论出发，在岩土体渗流特性、基本规律及渗透变形机理、机制的研究基础上，发展了岩体现场高压渗透试验方法，提出了渗透变形应力相关性试验方法并开发了相关仪器设备，应用数值方法研究了坝基、边坡与各类地下工程的渗流规律和渗流控制措施以及渗流控制标准等。本书涉及的大多数理论与实践研究成果，已在国内多个大中型水电工程、地下水封石油洞库工程中得到成功应用，取得了显著的经济效益。上述成果的取得，对于推动渗流理论在工程实践中的应用起到了很好的示范作用，同时也为渗流理论体系的完善作出了有益贡献。

本书系统地介绍了作者十多年来从事渗流理论及渗流控制技术的研究成果，总结了工程实践中的经验和教训，阐述了渗流分析的基本理论与方法，对于工程渗流问题的分析、渗流控制措施的设计与施工都具有指导意义。

中国工程院院士

王恩敬

2017年12月

前 言

渗流是流体通过孔隙介质的流体运动，岩土介质是一种典型的多孔介质。水利、交通、油气藏及环境工程等领域的许多关键性问题都与渗流相关，例如坝基及堤防工程渗流安全评价、降雨引起水利及交通工程中的滑坡灾害研究、水库蓄水引起的坝基及岸坡非常规变形安全评价、大型水封石油洞库水封性能以及核废料长期地质储存可靠性分析等都与岩土介质中的渗流分析息息相关。在这些工程中，对渗流场的正确认识在渗流控制技术解决方案中起着决定性作用。工程领域不同，渗流分析的目标也不相同，因此，工程渗流分析需要基于渗流基本理论，结合具体工程渗流问题，对工程渗流介质特性以及渗流场的时空变异特性进行深入研究后，才能提出合理可行的渗流控制措施，为工程安全建设与正常运行提供强有力的保障。

目前，相关领域对工程渗流问题的研究都取得了丰硕的成果，也推动了渗流理论与渗控技术的发展。然而，由于岩土介质及渗流问题本身的复杂性，采用渗流理论解决水利、交通等领域与渗流相关的问题时，仍然面临诸多技术难题，阻碍了渗流理论在工程实践中的应用。

随着计算机硬件技术的飞速发展，基于渗流理论的数值方法与计算机软件日益完善，推动了复杂工程渗流问题的研究，为工程渗流控制技术的优化研究与渗控效果的定量评价提供了保障，也为推动工程渗流理论在工程实践中的应用奠定了基础。

水利、交通、油气藏及环境工程领域对渗流理论与渗流控制技术的需求围越来越广。对于具体工程渗流问题来说，如何利用渗流理论为工程技术或工程措施的研发服务是科研工作者及工程技术人员必须要回答的问题。工程目标不同，人们采用的渗流工程措施也不相同。例如，在油气开采工程中，人们采用各种手段来增大油藏介质的渗透性来提高油气的产量；而在水利工程中，人们则通过多种防渗技术来减小坝基的渗透性从而降低水库的渗漏量。由此可见，全面系统地认识渗流介质的渗流特性、掌握渗流运动基本规律、探索渗流相关的实验方法、了解工程渗流机理和渗流场的时空演化过程，对解决工程渗流问题具有十分重要的理论与实践意义。

1. 工程渗流问题

本质上讲，地下工程渗流理论主要阐述地下水在岩土介质孔隙中的流动特性、流动规律以及渗流效应等方面的知识。工程中的岩土介质既可以是包含“气和水”的三相介质，也可以是只包含“气或水”的两相介质。当岩土体中孔隙中同时存在气水两相流时，岩土体中的渗流为非饱和渗流；而当岩土体孔隙中完全由水充满时，渗流则是饱和渗流。土体的饱和渗流与非饱和渗流特性存在显著的差别。在研究非饱和渗流特性对工程有重要影响的工程时（例如边坡工程渗流），就需要考虑边坡土体的非饱和渗流特性对渗流场的影响。而在研究坝基渗流场的空间分布时，由于坝基岩土体完全淹没在水库水位之下，采用饱和渗流分析理论则可以较好地解析坝基渗流场的空间变化。

对工程渗流而言，大多数工程（边坡及坝基工程等）的渗流场都是随着时间的变化而变化的。实际工程中严格的恒定渗流场是不存在的；但某些情况下，渗流场的变化幅度可能很小，此时的渗流场可以简化为恒定渗流场，例如正常蓄水条件下的坝基渗流场就属于这种情况。越来越多的研究表明，工程渗流风险发生在非恒定渗流阶段，因此，对控制渗流灾害问题而言，研究工程非恒定渗流特性更有实际意义。

饱和软黏土地基固结是岩土类孔隙介质流固耦合作用的最显著、最常见的现象。事实上，当各种流体在孔隙介质中运动时，固体孔隙介质和流体介质之间都会存在相互作用、相互影响的现象，即耦合效应。对不同的工程来说，流固耦合效应的强弱程度也不相同。例如，饱和软黏土地基、高压引水隧洞等岩土体的流固耦合效应很强，工程分析时必须考虑流固耦合效应的影响。对于一些低水头作用下的堤防工程或低坝地基而言，其耦合效应相对较弱，工程分析时，可以不考虑耦合效应对工程安全带来的影响。

热胀冷缩是自然界中一切物质都具有的自然现象。温度变化导致固体介质产生热胀冷缩变形，这种变形受到约束时，就会在固体内部形成温度应力。过大的温度应力也可以导致岩土类孔隙介质产生破坏。对于渗流环境中的岩土介质，孔隙流体和固体介质之间的热胀冷缩程度不同还会导致渗透压力的改变，进而影响到流体与固体之间的耦合效应。因此，研究热传导引起的温度变化对流体和固体物理力学性能的影响也是必须要考虑的问题，而热流固耦合理论对于此类问题的分析提供了理论基础。

综上所述，工程渗流问题一般都比较复杂，涉及饱和非饱和渗流、恒定非恒定渗流、多相耦合渗流以及非等温渗流等。渗流理论研究的目的是为工

工程渗流问题分析和渗控技术方案的确定提供基础理论支撑。

2. 渗流问题研究方法

工程渗流理论的科学研究起始于法国人亨利·达西，他经过长期实验，于1856年总结出了水在砂土中的流动规律，即著名的达西定律。达西定律描述了渗透速度与水力坡度之间的线性关系，称线性渗透定律。自从达西奠定了渗流计算理论的基础之后，渗流理论取得了长足发展。1889年，茹可夫斯基首先推导出了渗流微分方程；1922年，巴甫洛夫斯基提出了求解渗流场的电模拟法，为解决比较复杂的渗流问题提供了一个有效工具，并由电模拟法逐步发展到电网模拟法；1931年，Richards将达西的线性渗流理论推广应用到非饱和渗流中，从此开始了非饱和渗流的研究，水流控制Richards方程很快便建立起来；随后，基于Richards控制方程的饱和-非饱和渗流得到了深入研究，并成功地应用到许多实际工程中。

20世纪后期至今，由于工程建设的需要，渗流理论研究得到了进一步发展，例如饱和非饱和渗流理论、分形渗流理论、流固耦合渗流理论及非等温条件下的渗流理论都取得了较为丰富的研究成果。对工程渗流问题的研究主要有以下几种方法。

(1) 解析法。解析法是在一定的物理背景下，建立所求解渗流问题的数学模型，直接用渗流计算公式求出渗流要素的方法。工程渗流分析的解析公式一般较为简单，使用方便，在对工程渗流问题的宏观把握时经常采用。其不足之处是计算成果的精度较低。

(2) 物理模型试验法。物理模型试验是在实验室条件下，按照原型用不同比例尺模型，对工程问题或现象进行研究的一种科学方法。作为工程科学研究的一种手段，该方法在水利工程领域的应用范围很广。通过物理模型试验，可以揭示和分析工程渗流现象的本质和机理，验证理论分析成果，并解决工程实际问题。

(3) 现场试验法。工程渗流问题分析的关键在于获取渗流分析的基本参数，例如渗透系数、临界水力坡降等。现场试验能更好地接近工程原始条件，获得的数据也接近真实情况，因此其成果的可靠度较高。现场试验不足之处是耗资巨大、测试条件复杂、环境恶劣。

(4) 数值分析法。随着计算机技术的进步，利用数值模拟方法研究复杂工程渗流问题越来越为广大科技工作者所认同。数值模拟过程是在一定的物理条件下建立数学模型，然后用有限元法、有限差分法以及有限体积法等数值方法，将渗流区域进行离散求解，最后得到渗流问题的数值解。数值分析

能克服物理试验的不足，节约时间与经费。

3. 本书内容安排

本书遵循基本理论研究、试验研究和工程实践研究的逻辑及思路进行编写。

渗流工程问题的分析与研究离不开渗流理论这块基石。渗流基本概念、基本原理、基本规律等理论知识是分析工程渗流问题本质的关键所在。为此，本书第1章首先介绍岩土类孔隙介质渗流基础理论，重点介绍了孔隙介质中流体和固体的基本物理性质以及渗流基本方程。第2章在介绍孔隙连续介质的力学性质基础上，研究了岩土类孔隙介质的多相多场耦合理论。

试验研究是获取岩土类材料工程渗流性质最直接和最可靠的方法之一。针对高水头电站对高坝坝基岩体和高压引水隧洞围岩的抗渗性要求高的特点，为深入认识岩体在高渗压作用下的渗透特性，本书第3章首先研究了岩体高渗压作用下的渗透系数计算方法，然后提出了岩体渗透性的高压压水试验方法，并将该方法应用在黑麋峰抽水蓄能电站高岔管围岩高压渗透性试验研究中，分析了该工程岔管区围岩在高渗压条件下的渗透性变化规律。同时，为了了解岩体在渗压作用下的水力劈裂特性，基于上述压水试验成果，第4章在研究裂隙岩体水力劈裂机理的基础上，分析了岩体水力劈裂扩展过程，提出了岩体水力劈裂压力的分析方法。

渗流作用下岩土体的渗透变形及渗透破坏现象是水利工程中常见的渗流灾害之一。现有的土体渗透变形理论的研究成果丰富，第5章在现有渗透变形理论的基础上，通过理论分析和试验手段，研究了考虑应力状态影响的岩土体渗透变形特点，提出了渗透变形的应力相关性理论，为分析处于较高应力状态中的高坝坝基岩体及高压引水隧洞围岩的渗透变形机理及抗渗强度参数的确定提供了新思路。

数值分析方法是全面认识岩土介质渗流效应的有效手段。第6章利用非恒定渗流数值分析方法，研究了高压引水隧洞非恒定渗流场的时空演化特性以及高压引水隧洞断层带置换处置措施对渗流的控制效果，评价了引水隧洞局部不良地质体处置措施的合理性。第7章针对复杂坝基工程的渗流特性，提出了坝基渗透性数值计算分析的空间差异性数学描述方法，采用恒定渗流数值分析法，结合工程实测渗流监测资料，全面深入地分析向家坝水电工程典型坝段的扬压力分布规律、防渗帷幕及排水孔幕等措施的渗控效果。第8章针对重力坝坝基抽排系统的运行控制标准问题，采用数值分析方法进行了深入研究，基于排水孔出流量与坝基扬压力和水力坡降的关系，提出了重力坝排水

孔出流量控制标准的研究方法，得到了向家坝典型坝段排水孔的出流量控制标准。

降雨是引起边坡失稳、形成滑坡灾害的重要因素之一。国内外大多数滑坡都是降雨诱发的。降雨引起边坡渗流场发生变化，改变了渗透力的空间分布，导致边坡安全性降低。第9章从边坡土体非饱和渗流特性研究入手，分析了边坡降雨入渗的基本规律，提出了复杂三维边坡非饱和渗流数值分析方法，得到了典型工程边坡的饱和和非饱和渗流场的时空演化规律。

水库蓄水引起大坝坝基及近坝库岸边坡产生抬升变形现象受到越来越多的重视。第10章全面综述了国内外抬升变形的案例，总结了水库蓄水岸坡及坝基抬升变形的特点，利用流固耦合数值分析方法研究了抬升变形机理，重现了向家坝左岸近坝边坡抬升变形过程，评价了抬升变形对工程安全性的影响。

理论上，渗流环境中的岩体都存在流固耦合效应，然而这种耦合效应只是在高渗压环境条件下才比较突出。第11章结合黑麋峰抽水蓄能电站现场试验成果，研究了高渗压岩体渗流作用下岩土体的流固耦合效应。第12章结合现场试验资料，研究了核废料地质储存库围岩的热流固耦合效应，分析了核废料放射作用下围岩温度升高引起的温度场、渗流场、应力场和变形的演化规律。

大规模水封石油洞库的建设在我国是一个全新的领域，在工程实践中还存在诸多悬而未决的问题。本书第13章采用渗流数值分析方法，揭示了大型水封石油洞库区地下水位的变化过程，合理地评价了石油洞库的水封能力。通过理论研究和数值分析，提出了水封石油洞库安全运行的水封新准则，并进行了合理性验证。

总之，本书所涉及的内容绝大多数都是作者近十多年来的研究工作总结与升华。编写本书的目的之一在于分享作者在渗流理论研究与工程实践方面的一些经验与教训，也期望为同行在遇到类似问题时提供可借鉴的思路、理论与方法。

由于作者水平的限制，书中的不足和欠妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者

2017年12月

目 录

序

前言

第1章 渗流分析基础理论	1
1.1 渗流和渗流力学	1
1.2 流体介质的物理性质	1
1.3 多孔介质的物理性质	4
1.4 连续介质思想	7
1.5 连续介质渗流性质	9
1.6 流体状态方程	12
1.7 运动方程	13
1.8 连续方程	20
第2章 多场耦合渗流理论	25
2.1 孔隙连续介质力学性质	25
2.2 流固耦合理论	30
2.3 热流固耦合理论	36
2.4 非饱和热流固耦合理论	40
第3章 岩体高压渗透性试验	47
3.1 引言	47
3.2 岩体高压渗透系数计算公式	47
3.3 高压压水试验方法研究	50
3.4 黑麋峰岔管段围岩高压渗透性试验研究	55
第4章 岩体水力劈裂特性	60
4.1 水力劈裂机理	60
4.2 岩体水力劈裂扩展过程分析	64
4.3 黑麋峰岔管段围岩水力劈裂压力分析	67
4.4 小结	69
第5章 渗透变形的应力相关性	71
5.1 无黏性土渗透变形理论	71
5.2 黏性土渗透变形理论	74

5.3	抗渗强度的应力相关性理论	75
5.4	渗透变形应力相关性实验研究	78
5.5	小结	90
第6章	高压水工隧洞非恒定渗流特性	91
6.1	工程概况	91
6.2	非恒定渗流数值模型建立	93
6.3	施工期非恒定渗流场分析	94
6.4	运行期渗流场分析(断层带不置换)	97
6.5	运行期渗流场分析(断层带置换混凝土)	99
6.6	测点渗压变化过程分析	102
6.7	小结	105
第7章	复杂坝基渗流特性分析	106
7.1	引言	106
7.2	渗透系数空间分布特性	106
7.3	向家坝坝基渗控工程概况	108
7.4	数值模型	109
7.5	坝基渗控效果分析	110
7.6	小结	113
第8章	重力坝坝基排水孔涌水量控制标准	115
8.1	引言	115
8.2	工程概况	116
8.3	渗流计算模型	117
8.4	排水孔涌水量控制标准确定步骤	120
8.5	计算成果及分析	120
8.6	小结	126
第9章	边坡饱和非饱和渗流特性	127
9.1	土体非饱和渗流特性	127
9.2	降雨入渗基本规律	130
9.3	边坡降雨入渗的三维非饱和渗流数值方法	132
9.4	降雨过程边坡非饱和渗流场分布特性	135
9.5	小结	143
第10章	坝基及岸坡抬升变形研究	144
10.1	引言	144
10.2	坝基及岸坡抬升变形文献研究	144
10.3	岸坡抬升变形的水文地质条件	152
10.4	坝基及岸坡抬升变形分析理论	152

10.5	抬升变形机理数值试验	152
10.6	向家坝左岸边坡抬升变形研究	157
10.7	小结	168
第 11 章	高渗压岩体流固耦合效应	169
11.1	基本理论	169
11.2	数值模型	170
11.3	计算结果及分析	172
11.4	小结	182
第 12 章	岩体热流固耦合效应	184
12.1	引言	184
12.2	热流固耦合模型	185
12.3	数值模型	186
12.4	计算成果分析	188
12.5	小结	190
第 13 章	地下水封石油洞库相关渗流问题研究	192
13.1	引言	192
13.2	两相流数值理论	192
13.3	洞库区地下水位变化特性分析	193
13.4	水封准则研究	201
13.5	小结	207
参考文献		208

第1章 渗流分析基础理论

1.1 渗流和渗流力学

渗流 (fluid flow in porous media) 是流体通过多孔介质的流动。其流体是符合牛顿剪切定律的气体、液体、气-液混合物等普通牛顿流体以及部分具有简单流变方程的非牛顿流体 (牛顿流体可谓是黏度为常数的流体, 其常数的意义指的是黏度与速度场无关, 但可以是温度的函数)。

在渗流工程中, 多孔介质表面作用明显, 流体流动过程中任何时候必须考虑黏性的作用; 地下渗流中通常具有较高的压力, 压力变化亦比较明显, 需要考虑流体和介质的压缩性; 孔道结构复杂, 有时需要考虑毛管力的作用; 某些情况下还需要考虑吸附、解吸、弥散等物理化学作用。

渗流力学 (mechanics of fluid flow in porous media) 是研究流体在多孔介质中运动规律的科学。它是流体力学的一个独立分支, 是流体力学与岩石力学、多孔介质理论、表面化学和物理化学以及生物学交叉渗透形成的一门应用基础学科。

研究流体渗流过程的方法有流体力学方法、水动力学方法和实验方法。流体力学方法用严格的数学语言来描述流体运动规律, 将实际问题抽象为具体的数学模型, 追求问题的精确解; 水动力学方法则针对某些比较复杂的实际问题, 将流体力学的某些结论与实验或试验观察结果相结合, 采用数理分析等统计方法, 力求做出定量的解释, 给出能够满足工程实际要求的近似解; 实验方法是在复杂渗流条件下, 理论上常常不能解决具体问题, 通过实验模型模拟实际渗流发生的条件和过程, 以确定流体渗流的规律。

渗流系统: 一般情况下, 渗流力学只研究所关心的多孔介质的一部分, 称这部分多孔介质地层为渗流系统 (system of porous flow), 称其余部分为渗流环境 (circumstance of porous flow)。如果渗流系统和渗流环境之间有自由的质量和能量交换, 则这种渗流系统为开放系统 (open system); 如果渗流系统和渗流环境之间没有质量和能量交换, 称这种系统为封闭系统 (closed system)。

1.2 流体介质的物理性质

流体介质是指分布在岩土体孔隙或裂隙中的可流动、扩展的液相或气相介质, 包括孔隙水、裂隙水、石油、天然气以及煤层中的瓦斯等。对土木工程和水电工程中的岩土体渗流而言, 流体介质一般是水或空气, 或者水和空气的混合物。

从力学分析的意义来讲, 流体与固体的最主要差别在于它们对外力的抵抗力不同。固



体在受到外力的情况下，将产生相应的变形来平衡外力。而流体在受到外力作用的时候，也可以产生变形来抵抗外力，但其最大特点是不能承受拉力，同时处于静止状态的流体也不能承受剪切力。当流体在很小的剪切力作用下，它可产生连续不断的变形，也就是流动，直到剪切力消失。流体的这种性质称为可流动性。

1.2.1 密度和重度

流体和固体一样，密度是其最基本的物理指标之一。一般情况下，作为连续介质的流体，其密度往往在渗流分析中被看做是一个固定不变的量，实际上，在多孔介质中做渗流运动的流体，其密度在空间分布上的变化是比较大的。空间上任意一点 P 的密度可以表示为

$$\rho_f = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V_0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1.1)$$

式中： ρ_f 为流体的密度； ΔV 为流体元的体积； ΔV_0 为流体特征体元； Δm 为流体元体积内的质量。

如果流体是连续的，则对于任意相邻的两点 P_1 和 P_2 ，有

$$\rho_f(P_1) = \lim_{P_2 \rightarrow P_1} \rho_f(P_2) \quad (1.2)$$

4℃的蒸馏水密度为 1000kg/m^3 。

重度是工程上表征流体的物理性质的另外一个物理量，它指的是单位体积的流体的重量，与密度之间的关系为

$$\gamma_f = \rho_f g \quad (1.3)$$

式中： γ_f 为流体的重度； g 为重力加速度。

1.2.2 黏滯性

流体在运动状态下具有一定程度的抵抗剪切变形的能力，这种性质称黏滯性。黏滯性的大小，一般采用黏滯系数 μ 来度量，其单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

当液体之间存在相对运动时，液体之间会产生一种摩擦力阻碍液体的相对运动，这种力叫黏滯力（内摩擦力）。它随相对运动的产生而产生，消失而消失。

黏滯力的大小可以用牛顿内摩擦定律来加以描述，见图 1.1。

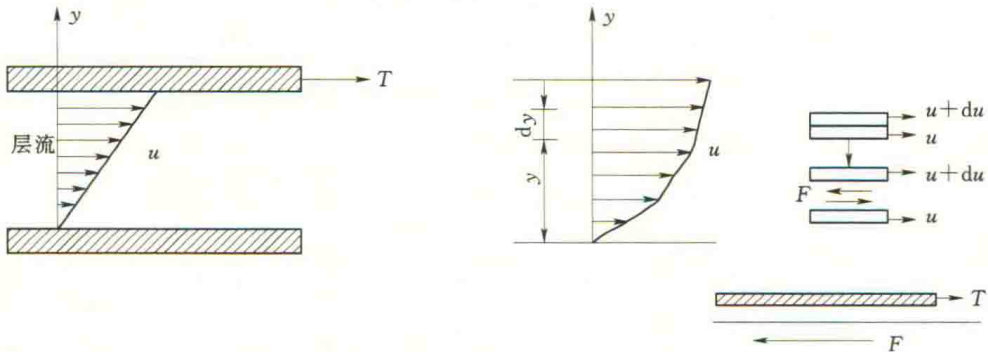


图 1.1 流速分布图



设 F 为流体内的剪切力, u 为流体运动速度, 如果流体满足下述假定:

- (1) F 与 du/dy 成正比。
- (2) F 与液体的接触面积成正比。
- (3) F 与液体的性质有关。
- (4) F 与接触面上的法向应力无关。

则有 $F = \mu A du/dy$, 其中 μ 是流体的动力黏滞系数, A 是面积。于是流体内单位面积上的内摩擦力 (或称剪应力) 可以表示为

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \text{ (层流)} \quad (1.4)$$

当 μ 为常量时, 流体称为牛顿流体; 当 μ 是变量时, 称为非牛顿流体。式 (1.4) 就是孔隙流体在层流状态下著名的流体牛顿内摩擦定律。

流体黏滞系数有以下性质: ① μ 的大小表示液体黏性的强弱。② 不同的液体 μ 不同。③ 温度是影响 μ 的主要因素。④ 运动黏滞系数为流体的黏滞系数与流体的密度之比,

$$\nu = \mu / \rho_f \quad (1.5)$$

运动黏滞系数的单位为 m^2/s 。

1.2.3 压缩性

流体中的压强增高时, 流体分子间的距离减小, 流体宏观体积减小, 这种性质称为压缩性。流体温度升高或压力降低时, 流体宏观体积增大, 为膨胀性。流体不能承担拉力, 一般不用弹性而用压缩性来表示其在外力作用下的变形能力。

设压缩前体积为 V , 压强增加 ΔP 后, 体积减小 ΔV , 体应变为 $\frac{\Delta V}{V}$, 则流体压缩系数定义为

$$\beta = -(\Delta V/V)/\Delta P \quad (1.6)$$

式中: β 为体积压缩系数, m^2/N 。

$$K = \frac{1}{\beta} = -\Delta P/(\Delta V/V) \quad (1.7)$$

式中: K 为体积弹性系数, N/m^2 。

对于水而言, 体积弹性系数 $K = 2.1 \times 10^9 Pa$, 如 ΔP 为一个大气压时, $\Delta V/V = 1/20000$, 因此, 在 ΔP 不大的条件下, 水的压缩性可以忽略; 当 ΔP 较大情况下, 水的压缩性则不可忽略。

1.2.4 表面张力

流体不能承受张力, 但有缩小其表面积的特性, 这种特性称为表面张力。表面张力多出现在流体与其他固体介质, 或不同流体之间的界面上。对水而言, 在 $20^\circ C$ 水温条件下, 其表面张力 $0.0728 N/m$ 。由此可见, 常温下水的表面张力较小, 在工程水力学中可以忽略。当水的自由面为曲率半径很小的曲面时, 表面张力的合力对自由面产生影响, 这种情况下就需要考虑表面张力的影响。在岩土介质中, 由于孔隙尺寸和裂隙宽度均很小, 在表面张力的作用下会形成毛细现象, 导致岩体介质体中的自由水面随毛细现象出现而升高。



表面张力是岩土介质渗流分析必须要考虑的一个重要性质。水的物理学参数与温度的关系见表 1.1。

表 1.1 水的物理力学参数与温度的关系

温度 /℃	重度 γ /(kN/m^3)	密度 ρ /(kg/m^3)	黏滞系数 μ /($\times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)	运动黏滞系数 ν /($\times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$)	体积弹性系数 E_w /($\times 10^{-6} \text{N}/\text{m}^2$)	表面张力 T_b /(N/m)
5	9.807	1000.0	1.519	1.5189	2.06	0.0749
10	9.804	999.7	1.307	1.3101	2.10	0.0742
15	9.798	999.1	1.145	1.1457	2.15	0.0735
20	9.789	998.1	1.002	1.0105	2.18	0.0728
25	9.777	997.0	0.895	0.8976	2.22	0.0720
30	9.764	995.7	0.798	0.8037	2.25	0.0712

毛管力从毛细现象演化而来。在毛管中，跨越两种非混合相流体界面所必须克服的压力为毛管力。在同一位置处，毛管力等于非湿相压力 p_{m_w} 减去湿相压力 p_w

$$p_c = p_{m_w} - p_w = \frac{2 \times 10^{-3} \sigma \cos \theta}{r} \quad (1.8)$$

式中： p_c 为毛管压力，MPa； r 为毛管半径， μm ； σ 为界面张力，MN/m； θ 为湿润接触角。

在不混溶多相体渗流过程中，有时需要考虑毛管力。

1.3 多孔介质的物理性质

固体多孔介质是含有大量空隙的固体材料，简称多孔介质 (porous media)。简洁概括什么是多孔介质是比较困难的。一般地，能够定义表征单元体积是多孔连续介质定义的必要条件之一。表征单元体积是指无论将这种单元置于孔隙介质域中的何处，该单元都既包含固体相，又包含孔隙空间。如果在域内不能定义这样的表征单元，则该域不能定义为多孔介质。

多孔介质为多相物质所占据的一部分空间，其固体部分称为固体骨架，而其余部分称为孔隙空间；孔隙内可以是单相气体或液体，也可以是多相流体，至少某些孔隙空间构成相互连通的通道；固体骨架、孔隙和通道应当遍及整个多孔介质所定义的空间。

1.3.1 多孔介质水力学基本特性

多孔介质一般具有以下特性：

- (1) 储容性，即能够储集和容纳流体。
- (2) 渗透性，允许流体在孔隙中流动。
- (3) 具有润湿性，孔隙表面与流体接触中所表现的亲和性。
- (4) 大比表面性，单位体积孔隙的总表面积有时相当大。
- (5) 非均质性，平面上和纵向上物理性质时常差异明显，孔隙结构狭窄而复杂。



多孔介质的非均质特性是指多孔介质的渗流力学性质（如储容性）与位置相关，即某点的性质明显与另外点不同。当多孔介质具有非均质特性时称该介质为非均匀介质。如果多孔介质的渗流力学性质与方向相关，即某方向的性质明显与另外方向不同，则称为各向异性介质。由此，多孔介质可分为非均匀介质、均匀各向同性介质和均匀各向异性介质。

1.3.2 多孔介质特性描述

从实用的观点考虑，需要对多孔骨架的几何性质进行描述。由于介质骨架的复杂性，要想用曲面方程来描述构成骨架的固体颗粒的几何形状是不可能的。目前主要有两种描述方法：一种方法是宏观的，也就是平均的描述，即用孔隙度、比面等特性参数来反映多孔介质骨架的性质；另一种方法是以骨架的某些统计性质为基础来进行描述。

1. 粒径分布

对于土体类非固结多孔介质，特别是实验室中的人造非固结介质，可以用粒径分布来描述。除了圆球或正多面体，颗粒的大小不能用一个尺寸唯一确定。在一般情况下，测量粒径和粒径分布的主要方法有筛分法和比重计两种，它们分别适用于较大颗粒和较小颗粒。筛分法是将固体颗粒放在具有一定尺寸的正方形网格的筛子上进行摇晃，所以颗粒的尺寸依赖于筛眼的尺寸。对于不规则形状的颗粒，这只能反映其大致尺寸。粒径尺寸通常用标准筛目或 μm 表示，目（mesh）是每 2.54cm 长度上具有的编织丝的数量。目与粒径的换算关系为

$$\text{颗粒直径}(\mu\text{m}) = 16 \times 10^3 / \text{筛目数} \quad (1.9)$$

比重计法是按照颗粒在流体中的沉降速度来分选颗粒的大小。

2. 孔径分布

对于固结多孔介质，一般无法给出其粒径分布，故只能用孔径分布方式来描述。孔隙直径 δ 定义为孔隙中能放置的最大圆球直径。孔径分布可用因子 α 来定义，其中， α 是孔径在 δ 和 $\delta + d\delta$ 之间的孔隙所占总孔隙体积 V_p 的百分比，于是有

$$\int_0^{\infty} \alpha(\delta) d\delta = 1 \quad (1.10)$$

3. 裂隙宽度

岩体中既包含孔隙，也存在大量裂隙。孔隙与裂隙共同构成了岩体中的空隙，为流体提供渗流通道。由于岩体中的裂隙尺度相对于孔隙尺度要大很多，岩体的渗流主要受裂隙通道的影响。因此，裂隙宽度成为岩体渗透性的控制性因素。

描述岩体中的裂隙隙宽主要有两类：机械隙宽和水力等效隙宽。机械隙宽又包括均值隙宽、最大机械隙宽和残留裂隙宽。

对于理想的平行板裂隙，其隙宽 a 是常数。岩石中的实际裂隙隙宽 a 是变化的。当裂隙尺寸相对不大时，假定裂隙的中面是一个平面，该平面的局部坐标系为 xoy ，则裂隙隙宽是坐标的函数，即 $a(x, y)$ 。为了描述及讨论方便，对裂隙隙宽作以下几种定义。

(1) 均值隙宽（mean aperture） \bar{a} 。设裂隙的平面尺寸为 $L_x \times L_y$ ，则均值隙宽定义为

$$\bar{a} = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} a(x, y) dx dy \quad (1.11)$$