

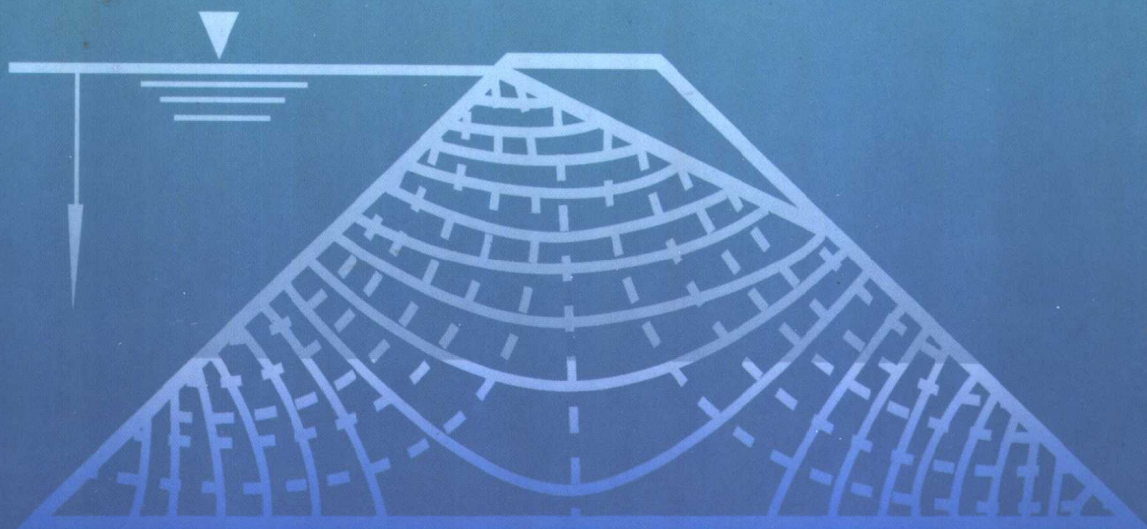
Seepage Computation Analysis & Control

渗流计算分析与控制

(第二版)

毛昶熙 主编

Mao ChangXi



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

Seepage Computation Analysis & Control

渗流计算分析与控制

(第二版)

毛昶熙 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统论述了各种类型水利工程的渗流计算方法和实验方法, 渗流参数的确定, 渗流破坏机理和渗流控制措施, 土工织物应用, 土石坝渗流观测资料分析, 异常渗漏处理, 病险水库隐患探测技术, 渗流作用下堤坝岸坡稳定性分析等, 共 9 章, 是一部理论结合实践的较系统的渗流专著。本书为水利水电工程的管理、设计、施工和科研, 提供了一系列有关渗流计算、分析和控制的方法和途径。本书可供从事水工、土工、水文地质、农田水利、地下水开发利用、石油开采, 以及矿床疏干等的科技人员使用, 也可供有关大专院校师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

渗流计算分析与控制/毛昶熙主编. —2 版. —北京:
中国水利水电出版社, 2003
ISBN 7-5084-1643-0

I. 渗… II. 毛… III. ①渗流-水力计算②渗流控制 IV. TV139.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 066611 号

书 名	渗流计算分析与控制
作 者	毛昶熙 主编
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京安锐思科贸有限公司
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 36.75 印张 858 千字
版 次	1990 年 5 月第 1 版 1990 年 5 月北京第 1 次印刷 2003 年 9 月第 2 版 2003 年 9 月北京第 2 次印刷
印 数	1781—4880 册
定 价	85.00 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



(作者近影, 2001年)

作者简介

毛昶熙: 抗日战争期间, 先后就读于西北农学院水利系和西北工学院水利系, 1941年毕业留校, 后在黄河水专、中原工学院(后并入河南大学)任教。抗战胜利后在南京中央水利实验处工作。1949年解放后, 留在南京水利科学研究院继续从事水工、渗流等方面的科研工作, 迄今未曾间断。主办了水工模型试验、闸坝工程水力学、渗流计算分析等多届学习研究班, 并在该学习研究班教材的基础上, 主编主写了水工和渗流方面的专著, 发表学术论文百余篇, 主持了国家攻关项目、省部重点项目、国家重点工程科研项目多项。其主持的研究项目成果曾获得全国科学大会奖、首届国家科技进步奖三等奖和1993年国家科技进步一等奖。



序 言

(第一版)

建国以来,水利事业有很大发展,建成了数以万计的大、中、小型工程,对工农业生产和城乡人民生活发挥了巨大作用。但也有不少工程存在着渗流破坏问题。

为确保工程安全,充分发挥效益,水利部工程管理局于1980年在部工程管理培训中心举办了土坝渗流研究班。为办班需要,请南京水利科学研究院毛昶熙等同志编写了《土坝渗流分析》教材,随后连续办班多次,并提供给各省、市、自治区水利部门办班使用。这对病险工程渗流的控制和处理,都起到了积极作用。

1986年以该教材为主要内容的评奖项目“病险水库土坝渗流安全分析研究及其应用推广”,获得了国家级科学进步奖。为使这本教材更加充实,去年编著者又进行了较多的补充和修改,成为现在的《渗流计算分析与控制》一书。

本书内容共分两部分,前11章是渗流基本理论和计算,包括:闸坝地基、土坝、减压沟井、水井、基坑排水、明沟暗管排水及渠道渗漏等各种类型水利工程的渗流计算,含有解析公式、实用的近似算法、模型实验方法和有限元法,并将影响渗流计算可靠性的有关参数的确定也加以论述;后7章是渗流控制和处理,包括:渗流破坏和控制、渗流变形和滤层防护、渗漏隐患探测和处理、观测和资料分析,以及土工织物应用等。

本书内容丰富,既有实践经验,又有理论计算。我们相信,本书的出版将会对我国水利水电工程渗流安全的科研、设计、施工、管理和对我国渗流学科的发展,起一定的促进作用。

水利电力部水利管理司

1988年1月

编 者 的 话

(第一版)

渗流学科的发展原来是作为很多学科领域的边缘学科向前发展的。渗流既是水力学又是岩土力学所不可缺少的组成部分,也是水工结构、水文地质、地下水文、农田水利、灌溉排水、地下水资源开发利用和石油开采以及矿床疏干等学科中的部分内容。但由于各有关学科的不断发展和生产实践中提出的渗流问题日益广泛复杂,现在,渗流已逐渐发展成为具有自己的理论、方法和应用范围的独立学科。目前在国外,已有渗流水力学、岩土水力学、地下水力学、渗流力学、地下水动力学、多孔介质中流体动力学等多种的渗流专著出版。

为了普及渗流安全的科学技术知识和推动我国渗流学科的发展,使水工渗流等方面的工程管理、设计和科研水平得到进一步提高,我们根据多年来的工作实践经验,在为水利部工程管理培训中心编写的教材《土坝渗流分析》的基础上,经过大量的修改和补充,写成了现在的《渗流计算分析与控制》一书。

本书内容共分18章。前半部是渗流基本理论和计算,包括:土石坝、闸坝地基、水井、减压沟井、施工基坑、明沟暗管、运河渠道等各种类型水利工程的渗流计算,有解析法、实用的近似算法、模型实验方法和有限单元法;并将影响渗流计算可靠性的有关参数的确定也列为专章。后半部从第12章开始,是渗流破坏和控制,以及土石坝观测资料分析和渗漏处理,还包括渗透变形、滤层防护、土工织物应用和同位素探测渗漏隐患等专章。参加编写的有关专业人员,按照各章顺序是:毛昶熙、周保中、吴世余、叶兴才、沙金焯、刘嘉炘、陶同康、李祖貽、陈平、吴良骥、李定方、王韦、葛祖立、李樟苏等14位同志。

本书在编写出版过程中,得到了水利电力部水利管理司和南京水利科学研究院的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。此外,对有关同志的相互校阅订正和帮助完成制图工作,在此也一并致谢。

毛昶熙

1988年10月21日

再 版 的 话

本书 1990 年出版后，受到广大读者欢迎，并于 1992 年荣获水利部全国优秀水利科技图书奖。由于该书早已售完，故出版社决定再次重印以满足读者的需求。作者趁此机会，除改正印刷错误外，补充第十九章讨论土坡渗流破坏的整体稳定性问题，以与第十二章的渗流破坏局部稳定性相呼应。不当之处尚望指正。并对出版社再版重印，深表谢意。

毛昶熙

2002 年 9 月于南京

目 录

序言 (第一版)

编者的话 (第一版)

再版的话

第一章 渗流基本理论	1
第一节 岩土渗流性质.....	1
第二节 达西定律.....	4
第三节 达西定律的适用范围与非达西流.....	8
第四节 杜布依近似假定	11
第五节 渗流基本方程式	13
第六节 缓变渗流的水平面渗流微分方程式	20
第七节 定解条件与数学模型的选用	24
第八节 流网	27
第九节 非均质和各向异性渗流	41
第十节 岩体裂隙渗流	48
第十一节 毛管水与非饱和渗流	56
参考文献	62
第二章 闸坝地基渗流计算	64
第一节 沿简单地下轮廓线渗流的精确解	64
第二节 复杂地下轮廓线的闸坝地基渗流近似计算	76
第三节 有透水板桩帷幕或排水的渗流计算	82
参考文献	87
第三章 土坝渗流计算	89
第一节 土坝渗流计算的任务和方法	89
第二节 基本假定及计算条件简化	90
第三节 不透水地基上均质土坝渗流计算	91
第四节 透水地基上均质土坝渗流计算	97
第五节 有限深透水地基上具有铺盖的土坝渗流计算	99
第六节 无限深透水地基上不透水铺盖斜墙土坝渗流计算.....	110
第七节 库水位下降时土坝的渗流计算.....	113
第八节 出口坡降计算.....	119
参考文献.....	123
第四章 侧岸绕渗计算	125
第一节 绕渗基本概念与计算方法说明.....	125

第二节	沿简单侧岸轮廓渗流的精确解·····	126
第三节	复杂边墩岸墙接头的绕渗近似计算·····	130
第四节	侧岸绕渗流网图解法·····	133
第五节	侧岸三向绕渗影响的实验解·····	134
参考文献	·····	137
第五章	减压沟井与基坑排水的渗流计算 ·····	139
第一节	排水减压沟井的布置原则·····	139
第二节	排水减压沟的渗流计算·····	140
第三节	排水减压井的渗流计算·····	152
第四节	多层地基中排水减压沟井的渗流计算·····	159
第五节	减压沟井渗流计算的实验公式·····	166
第六节	基坑排水布局方法·····	183
第七节	基坑排水的等效半径与影响半径·····	184
第八节	井点系统降水的渗流计算·····	188
第九节	围板桩的基坑排水计算·····	193
第十节	基坑排水的非稳定渗流计算·····	195
参考文献	·····	196
第六章	井的渗流计算 ·····	197
第一节	单层含水层的单井稳定流计算·····	197
第二节	多层含水层的单井稳定流计算·····	210
第三节	干扰井群的计算·····	215
第四节	单井非稳定流计算·····	220
第五节	有越流补给的含水层的单井计算·····	228
参考文献	·····	233
第七章	明沟暗管排水的渗流计算 ·····	235
第一节	布辛涅斯克方程·····	235
第二节	水平面内地下水的二元不稳定排水·····	236
第三节	铅直剖面内地下水的一元不稳定排水·····	239
第四节	排水明沟或暗管的间距计算·····	240
第五节	地下水一元与二元流动的区分界限·····	241
第六节	非线性蒸发条件下的排水计算·····	242
第七节	纯粹由蒸发而引起的地下水位下降·····	242
第八节	半无限排水问题及影响长度的计算·····	244
第九节	以铅直隔水层为边界的单沟排水·····	245
第十节	入渗作用下二元地下水的上升和下降·····	247
第十一节	初值按正弦曲线分布的入渗排水·····	248
第十二节	纯粹由入渗而引起的地下水位上升·····	250
第十三节	具有承压水与入渗和蒸发补给下的排水·····	251

第十四节 变渗透性问题	253
参考文献	254
第八章 渠道渗漏计算	255
第一节 概述	255
第二节 稳定自由渗漏	255
第三节 不稳定自由渗漏	257
第四节 稳定顶托渗漏	260
第五节 不稳定顶托渗漏	260
第六节 有防渗层的渠道渗漏	266
参考文献	257
第九章 渗流模型实验方法	268
第一节 砂模型	268
第二节 粘滞流模型	272
第三节 水力网模型和水力积分仪	279
第四节 导电液模型	284
第五节 电阻网模型	294
参考文献	304
第十章 有限单元法计算	306
第一节 土坝二向渗流计算的有限单元法	306
第二节 编制程序中的几个问题与计算实例	318
第三节 土坝三向空间稳定渗流的有限单元法	323
第四节 区域地下水的有限单元法	330
第五节 井的渗流计算的有限单元法	335
参考文献	342
第十一章 渗流基本参数的确定	343
第一节 确定渗透系数的方法	343
第二节 确定给水度或有效孔隙率的方法	352
第三节 确定单位贮存量与贮存系数的方法	355
第四节 野外抽水试验确定各参数	359
第五节 野外压(注)水试验确定各参数	368
第六节 水平与垂直渗透性不同的确定方法	375
第七节 各向异性的渗透张量	377
第八节 裂隙岩体各向异性参数的野外确定法	383
第九节 反演问题求参数法	392
参考文献	393
第十二章 渗流破坏与控制	395
第一节 渗流问题的重要性与破坏性	395
第二节 渗流控制基本内容	401

第三节 侧岸绕渗的三向渗流控制..... 408

第四节 闸坝地下轮廓线的渗径长度和合理布局..... 414

第五节 闸坝基底扬压力与护坦厚度..... 421

第六节 渗流作用力..... 425

第七节 孔隙水压力与有效应力..... 431

第八节 渗透力与孔隙水压力的应用实例..... 434

第九节 向上渗流的出口临界坡降及其防护..... 439

第十节 坡面出渗的临界坡降及其防护..... 443

参考文献..... 447

第十三章 土的渗透变形及滤层防护..... 448

第一节 渗透变形的类型及判别方法..... 448

第二节 渗流自下而上时管涌和流土的计算..... 452

第三节 接触冲刷和接触流土的计算..... 457

第四节 渗透变形的部位..... 458

第五节 粘性土的抗渗强度..... 459

第六节 软弱夹层的抗渗强度..... 461

第七节 水力劈裂..... 462

第八节 滤层的类型和作用..... 464

第九节 保护无粘性土的排水滤层..... 465

第十节 保护粘性土的排水滤层..... 466

参考文献..... 470

第十四章 土工织物和土工薄膜在渗流中的应用..... 471

第一节 土工织物滤层排水的应用..... 471

第二节 土工薄膜防渗的应用..... 477

第三节 化纤模袋在护坡上的应用..... 480

参考文献..... 484

第十五章 土石坝的渗流观测..... 485

第一节 渗压（或孔隙水压力）观测..... 485

第二节 渗流量观测..... 491

第三节 渗流现象的巡回观察..... 492

参考文献..... 493

第十六章 观测资料的整理和分析..... 494

第一节 原始资料的整理和选用..... 494

第二节 渗压资料的分析方法..... 499

第三节 渗流量资料的分析方法..... 502

第四节 渗透系数分析法..... 504

第五节 综合分析..... 505

第六节 整理和分析资料的微机方法..... 507

参考文献..... 509

第十七章 土石坝渗漏及其处理..... 510

 第一节 土石坝渗漏的形成..... 510

 第二节 铺盖裂缝塌坑渗漏处理..... 517

 第三节 垂直防渗墙处理渗漏..... 518

 第四节 灌浆方法处理渗漏..... 523

 第五节 排水..... 528

参考文献..... 530

第十八章 渗漏隐患探测技术..... 531

 第一节 同位素技术在探测病险水库渗漏中的应用..... 531

 第二节 探测渗漏隐患的地电法..... 539

参考文献..... 543

第十九章 渗流作用下堤坝岸坡稳定性分析..... 544

 第一节 渗流作用与滑坡稳定性概述..... 544

 第二节 滑坡计算的常规条分法及其存在问题..... 545

 第三节 滑坡计算有限元法..... 551

 第四节 模型土坝分析与几个滑坡土坝的计算验证..... 556

 第五节 渗流方向对滑坡的影响..... 558

 第六节 堤坝破坏的滑动面位置与复合滑动面..... 560

 第七节 浅层滑坡..... 564

 第八节 滑坡计算中的危险水力条件..... 567

参考文献..... 575

第一章 渗流基本理论*

第一节 岩土渗流性质

水或其他流体在岩土等孔隙或裂隙介质中的流动，可以统称为渗流，其流动性质则决定于作为渗流骨架的岩土性质与其中流体的性质。由于这些性质，特别是介质的孔隙大小形状及其分布异常复杂，就很难用孔隙形式表征其渗透性，也不易象地表水那样寻求水流质点的真实流速；所以常用平均概念和综合性的参数代表其渗流性质。

一、土的有关性质

土的有关性质，如粘性土，砂性土，砾石，碎石土等各种土类，由于生成物质的多样性，沉积条件与生成过程的多变性，往往是不均匀的。但由于水或风的搬运，多为松散的粒状堆积，因而属于互相连通的多孔介质。所以在渗流问题中经常引用颗粒分布曲线、孔隙率、容重等这些基本概念来描述土的组成和结构。颗分曲线如图 1-1 所示，可从曲线看出土的类别，并可查用认为是研究问题的控制粒径或特征粒径，如 d_{10} ， d_{15} ， d_{50} ， d_{60} ， d_{85} 等。对应小于重量 10% 的粒径 d_{10} 常被称为有效粒径， d_{60}/d_{10} 称为不均匀系数。这些控制粒径

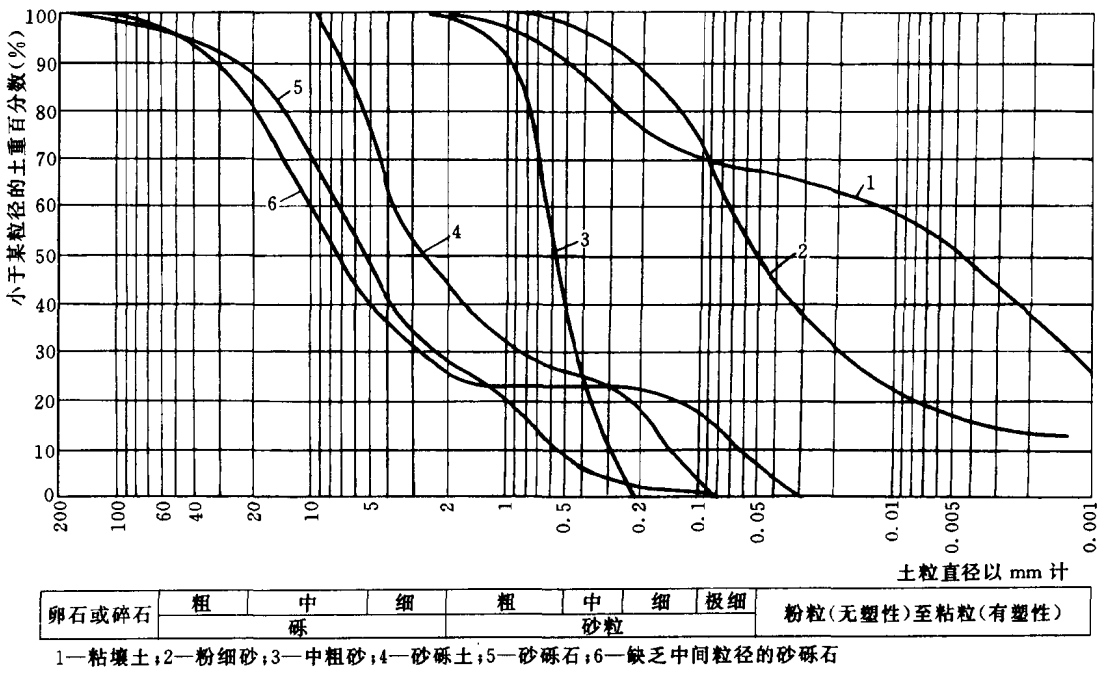


图 1-1 土颗粒大小分配曲线

* 编写者：毛昶熙

将在管涌和滤层规格中采用。

孔隙率及容重，表示土的密实程度，特别是孔隙率更对渗透性及稳定性起着重要的作用，它定义为孔隙体积与整个土体积之比，即体积孔隙率

$$n = \frac{V_0}{V} \quad (1-1)$$

它与一般土力学中研究压缩性时所采用的孔隙比 e (孔隙体积与固相土粒体积之比) 之间的关系为 (图 1-2)。

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \text{或} \quad n = \frac{e}{1+e} \quad (1-2)$$

孔隙率与颗粒形状排列组合有关，从理想化的同样大小球体以最松的立方体排列时 [图 1-3 (a)]， $n=0.476$ ；以最密的菱形体排列时 [图 1-3 (b)]， $n=0.26$ 。若小颗粒填在大颗粒之间的孔隙，则可降低 n 值。例如在图 1-3 (a) 立方体排列的孔隙中都被次一级的球体所填充，则 $n=0.125$ ；如果逐级颗粒填充孔隙，可得到最密实情况 $n=0.1$ 。对于粗细混合土料，孔隙率与不均匀系数有密切关系。图 1-4 为天然土在松紧不同情况下的试验结果。

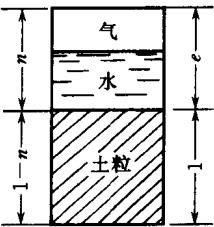


图 1-2 孔隙率与孔隙比示意

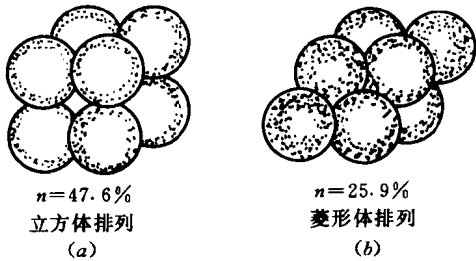


图 1-3 球体排列的孔隙率

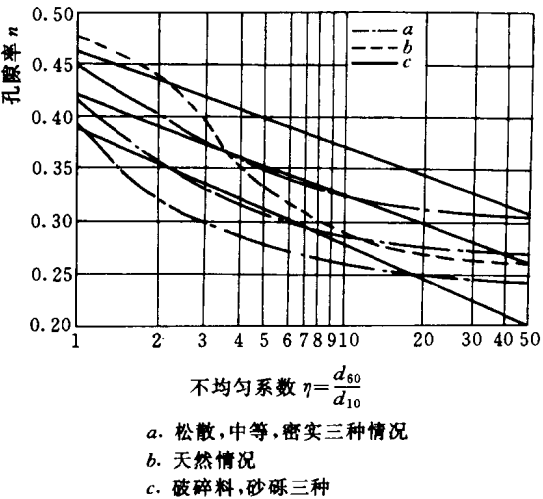


图 1-4 孔隙率与不均匀系数的关系^[5]

孔隙率不仅与土颗粒组成有关，而且与土的受压沉积等形成过程有关，一般天然土多为 $n=0.3\sim0.6$ (可参考表 1-1)，泥炭土的孔隙率高达 $0.6\sim0.8$ 。虽然孔隙率已大到 0.6 以上，但由于架空的拱作用，松散堆积体仍能处于稳定状态。用孔隙率可测定干燥与饱和土样的体积或对重量加以确定。

孔隙率固然与渗流有关，而孔隙通道的大小更为直接地影响透水性，并对研究管涌起决定性作用，对球体直径为 d 的立方体排列，其最小孔隙通道直径为 $d_0=0.414d$ ，菱形排列时为 $d_0=0.155d$ ；对不均匀的土，若用有效直径 d_e 表示时，其最小孔隙直径根据皮契肯分析为

$$d_0 = \frac{0.44n}{1-n}d_e \quad (1-3)$$

表 1-1 各种土的孔隙率及渗透系数^[5]

土 类	孔隙率 n	有效孔隙率 n_e	渗透系数 k (cm/s)
砂 质 砾	0.25~0.35	0.20~0.25	$3 \times 10^{-1} \sim 5 \times 10^{-2}$
砾 质 砂	0.28~0.35	0.15~0.20	$1 \times 10^{-1} \sim 2 \times 10^{-2}$
中 砂	0.30~0.38	0.10~0.15	$4 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-2}$
粉 砂	0.33~0.40	0.08~0.12	$2 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3}$
砂 壤 土	0.35~0.45	0.05~0.10	$5 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$
粘 壤 土	0.40~0.55	0.03~0.08	$5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-6}$
粉质粘土	0.45~0.65	0.02~0.05	$\approx 10^{-6}$

因为充填孔隙中的水，除能自由流动的重力水外，还有受分子力作用的吸着水和薄膜水（或称强的和弱的结合水），以及毛管水等各种形态的水，而且有水气和气泡的存在，所以真正作为水流动的孔隙必然减小。我们把这种能供给水流动的孔隙称为有效孔隙，它不仅与土粒和其间的孔隙大小有关，也受水头压力大小的影响。若以公式表示有效孔隙率 n_e 的概念，则为渗流有效孔隙体积与土体积之比

$$n_e = \frac{V_{oe}}{V} \quad (1-4)$$

有效孔隙率影响土的渗透性，其值可参见表 1-1。

式（1-4）所表示的内部渗流有效孔隙，还没有测定方法，因而常用在重力作用下自由排出水的体积 V_{op} 来近似代替它，排水有效孔隙率也称给水度或出水率，定义为

$$\mu = \frac{V_{op}}{V} \quad (1-5)$$

对应于给水度的另一充水有效孔隙率称为饱和不足度，即充水使土饱和所需的水量与土体积的比值，该值虽不同于给水度，但为了计算方便，常认为彼此相等。它们在充水浸湿过程中，有效孔隙率与原来土体中的含水量有一定关系，在土力学中以 w 表示重量含水量，即土体中水重 (γV_w) 与干土重 ($\gamma_d V$) 的比值，则此时的有效孔隙率 n_e 应为总孔隙率 n 减去含水量 w 所占据的孔隙率 n_w ，也就是最后剩余的气孔体积所占的比数，即

$$n_e = n - n_w = n - \frac{\gamma_d}{\gamma} w \quad (1-6)$$

式中： γ_d 为干土容重； γ 为水容重。因为 $w = \frac{\gamma V_w}{\gamma_d V}$ ， V_w 为含水量的体积， V 为土的总体积；故上式右边末项相当于体积含水量 n_w ，即含水量体积与土总体积比值。在渗流中常用体积含水量 n_w （也经常用符号 c 或 θ 表示）代替重量含水量 w 。再一个参数为土体中水的体积与全部孔隙的比值称为饱和度 S_w ，其间的关系为

$$S_w = n_w/n = \frac{\gamma_d}{\gamma} w/n \quad (1-7)$$

饱和度与渗透性密切相关，因为气泡存在能使渗水的孔隙体积减小，并增加对渗透的阻力。

二、岩石的有关性质

岩石和土的主要区别只是破碎程度的不同，甚至没有精确的界限。不过我们在这里要介绍的岩基是属于裂隙介质，岩块本身透水性很微，一般岩体的孔隙率约为 $n=0.01\sim 0.1$ ，渗透系数 $k<10^{-7}\text{cm/s}$ ，较之缝隙透水性要小 5~6 个数量级，因此可认为不透水，只是互相连通的缝隙发生渗流。当岩体有三组裂隙时，其总的孔隙率表示为

$$n = 1 - \prod_{i=1}^3 \left(1 - \frac{b_i}{B_i} \right) \quad (1-8)$$

式中： b 为裂隙宽度； B 为裂隙间距。

形成裂隙的原因主要是构造应力和受大气长期作用所致。垂直缝多是构造应力造成的，接近水平方向的层理缝是由沉积造成的。在不太深的表层，由于风化作用而使构造缝和层理缝张开，所以裂隙介质的岩石渗透性具有强烈的各向异性。如图 1-5 所示为几种岩石的不同裂隙情况。有时还有断层存在，其透水性更强，情况极为复杂。这些裂缝的壁面同样都有吸着水的存在，缝开口宽度小于 $4\times 10^{-6}\text{m}$ 时，一般就不会有重力水或自由水流动。

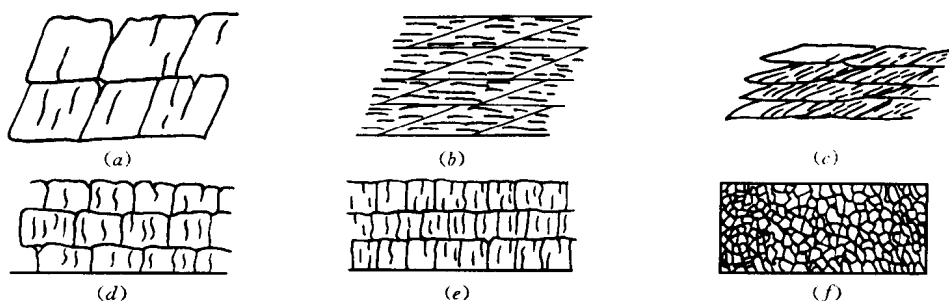


图 1-5 不同岩石的裂隙分布

(a) 片麻岩；(b) 云母片岩；(c) 千枚岩；(d) 石灰石；(e) 石英岩；(f) 风化白云石

有时固体介质本身既有裂隙又是多孔的，即所谓双重介质。例如岩溶地区，由于溶洞的存在就属于多孔性的裂隙岩石，裂缝的粘土则属裂隙多孔介质等。

此外对于介质在荷载或孔隙水压力改变情况下发生变形时，则应结合渗流场一并考虑，即所谓耦合问题。求解这些复杂的渗流问题，只有在计算机上进行数值计算。

最后指出，在孔隙或裂隙中水的流态，则决定于孔与缝和流速的大小，也即雷诺数的大小。大多数的工程渗流问题属于层流，极少数问题接近于紊流。

第二节 达 西 定 律

一、达西定律的实验说明

最早，法国工程师达西 (H. Darcy) 在垂直圆管中装砂进行渗透试验 (图 1-6)，试验结果证明，渗流量 Q 除与断面面积 A 成直接比例外，正比于水头损失 $(h_1 - h_2)$ ，反比于渗径长度 L ；引入决定于土粒结构和流体性质的一个常数 k 时，则达西定律可写为

$$Q = Ak \frac{(h_1 - h_2)}{L}$$

或
$$v = \frac{Q}{A} = -k \frac{dh}{dS} = kJ \tag{1-9}$$

式 (1-9) 中 v 为断面 A 上的平均流速，或称达西流速； J 为渗透坡降，即沿流程 S 的水头损失率； k 为渗透系数； h 为测压管水头，^❶ 它是压力水头与位置高度之和，即

$$h = \frac{p}{\gamma} + z \tag{1-10}$$

式中： p 为压强； γ 为水的容重。对于渗流来说，流速水头可以忽略，故测压管水头就代表单位重流体的能量， h_1-h_2 就代表能量的损失。

达西定律尚可应用于任意倾斜的渗流，如图 1-7 所示。这里必须提醒注意：发生流动的是测压管水头差，而不是压力水头差；例如图 1-7 中， $p_1/\gamma < p_2/\gamma$ ，水流是向压力增加方向流动。只有在水平向流动的特殊情况， $z_1=z_2$ ，可写作 $Q=kA (p_1-p_2) / \gamma L$ 。在垂直向流动的特殊情况，则为 $Q=kA [(p_1-p_2) / \gamma L + 1]$ 。

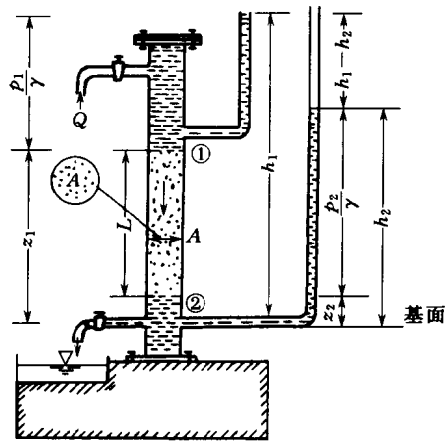


图 1-6 说明达西定律的试验装置

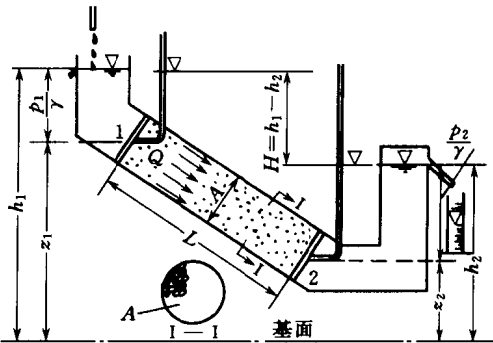


图 1-7 任意倾斜流动的水头示意

图 1-8 表示垂直向下流动的几种情况：该图 (a) $p_1 > p_2$ ，该图 (b) $p = \text{常数}$ ，该图 (c) $p_1 < p_2$ 。这几种情况可用控制下游溢流水面的高低来实现，说明沿程流动的压力变化尽管不同，而流向总是由高能头向低能头流动^[17]。

因此，代表单位重水体能量损失的测压管水头差 h_1-h_2 可以称之为驱动水头，也就是流程 L 距离克服阻力所作的功；因而水力坡降 $J = \frac{h_1-h_2}{L}$ 表示单位重液体沿程单位长度的能量损失或渗流阻力，可称之为驱动力。对单位质量液体来说，此力为 $gJ = g (h_1-h_2) / L$ 。

胡伯特 (1940) 定义单位质量水的势能为把单位质量水从一个参考基面 z_0 升高到实际的位置 z 所需要做的功，该 z 高度的压力设为 p 。此时地下水位势包括压力和位置，并可分别考虑，即单位质量水的压力升高到 p 所需做的功为 $W = \frac{1}{M} \int_0^p V dp$ ，因体积等于质量除以

^❶ 这里的测压管水头 h 是指某基面以上的测压管水面高度，即势能水头；有时指某点的测压管水头则为该点的压力水头 p/γ 。