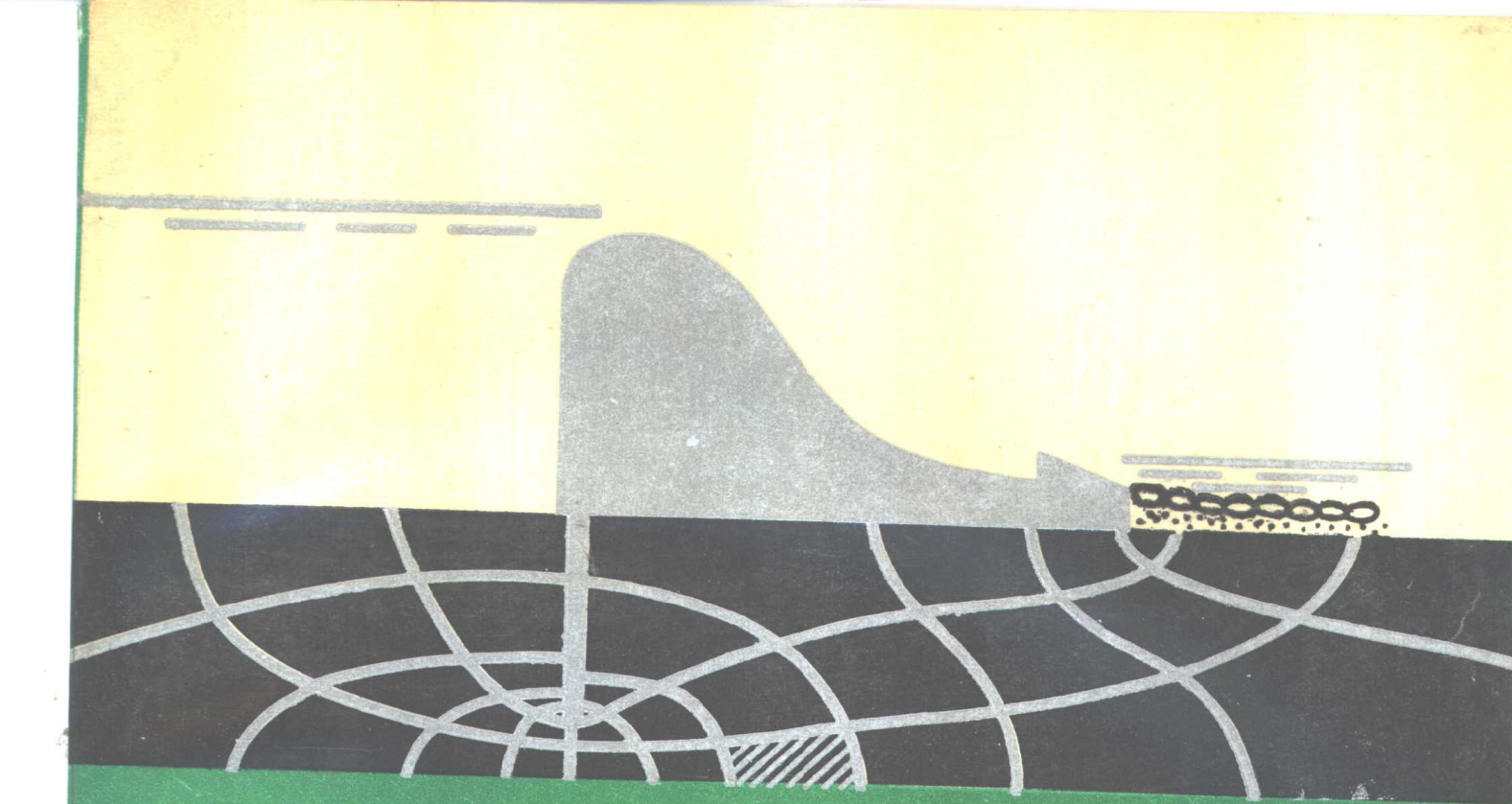


A stylized landscape illustration at the top of the cover. It features a yellow sky, a grey silhouette of a hill or dam, and a black foreground with white curved lines representing water or a grid. A small structure with a row of circles is on the right.

毛昶熙 主编

渗流计算分析与控制

水利电力出版社

渗流计算分析与控制

毛昶熙 主编

水利电力出版社

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等, 共18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。

渗流计算分析与控制

毛昶熙 主编

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 36.25印张 821千字
1990年5月第一版 1990年5月北京第一次印刷

印数0001—1780册

ISBN 7-120-00944-3/TV·310

定价10.35元

序 言

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

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

目 录

序言

编者的话

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.....	5
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.....	12
第五节 渗流基本方程式.....	14
第六节 缓变渗流的水平面渗流微分方程式.....	22
第七节 定解条件与数学模型的选用.....	26
第八节 流网.....	29
第九节 非均质和各向异性渗流.....	46
第十节 岩石裂隙渗流.....	53
第十一节 毛细水与非饱和渗流.....	62
参考文献.....	68
第二章 闸坝地基渗流计算	70
第一节 沿简单地下轮廓线渗流的精确解.....	70
第二节 复杂地下轮廓线的闸坝地基渗流近似计算.....	84
第三节 有透水板桩帷幕或排水的渗流计算.....	91
参考文献.....	96
第三章 土坝渗流计算	97
第一节 土坝渗流计算的任务和方法.....	97
第二节 基本假定及计算条件简化.....	98
第三节 不透水地基上均质土坝渗流计算.....	99
第四节 透水地基上均质土坝渗流计算.....	105
第五节 有限深透水地基上具有铺盖的土坝渗流计算.....	108
第六节 无限深透水地基上不透水铺盖斜墙土坝渗流计算.....	119
第七节 库水位下降时土坝的渗流计算.....	123
第八节 出口坡降计算.....	128
参考文献.....	133
第四章 侧岸绕渗计算	134
第一节 绕渗基本概念与计算方法说明.....	134

第二节	沿简单侧岸轮廓渗流的精确解	135
第三节	复杂边墩岸墙接头的绕渗近似计算	140
第四节	侧岸绕渗流网图解法	142
第五节	侧岸三向绕渗影响的实验解	143
参考文献		147
第五章	减压沟井与基坑排水的渗流计算	148
第一节	排水减压沟井的布置原则	148
第二节	排水减压沟的渗流计算	149
第三节	排水减压井的渗流计算	163
第四节	多层地基中排水减压沟井的渗流计算	170
第五节	减压沟井渗流计算的实验公式	177
第六节	基坑排水布局方法	195
第七节	基坑排水的等效半径与影响半径	196
第八节	井点系统降水的渗流计算	200
第九节	围板桩的基坑排水计算	205
第十节	基坑排水的非稳定渗流计算	207
参考文献		209
第六章	井的渗流计算	210
第一节	单层含水层的单井稳定流计算	210
第二节	多层含水层的单井稳定流计算	224
第三节	干扰井群的计算	229
第四节	单井非稳定流计算	234
第五节	有越流补给的含水层的单井计算	242
参考文献		248
第七章	地下水管排水的渗流计算	249
第一节	布辛涅斯克方程	249
第二节	水平面内地下水的二元不稳定排水	250
第三节	铅直剖面内地下水的一元不稳定排水	254
第四节	排水明沟或暗管的间距计算	255
第五节	地下水一元与二元流动的区分界限	256
第六节	非线性蒸发条件下的排水计算	257
第七节	纯粹由蒸发而引起的地下水位下降	257
第八节	半无限排水问题及影响长度的计算	259
第九节	以铅直隔水层为边界的单沟排水	261
第十节	入渗作用下二元地下水的上升和下降	262
第十一节	初值按正弦曲线分布的入渗排水	264
第十二节	纯粹由入渗而引起的地下水位上升	265

第十三节 具有承压水、入渗、蒸发补给下的排水	266
第十四节 变渗透问题	268
参考文献	270
第八章 渠道渗漏计算	271
第一节 概述	271
第二节 稳定自由渗漏	272
第三节 不稳定自由渗漏	273
第四节 稳定顶托渗漏	276
第五节 不稳定顶托渗漏	277
第六节 有防渗层的渠道渗漏	282
参考文献	283
第九章 渗流模型实验方法	284
第一节 砂模型	284
第二节 粘滞流模型	288
第三节 水力网模型和水力积分仪	295
第四节 导电液模型	300
第五节 电阻网模型	311
参考文献	321
第十章 有限单元法计算	323
第一节 土坝二向渗流计算的有限单元法	323
第二节 编制程序中的几个问题与计算实例	335
第三节 土坝三向空间稳定渗流的有限单元法	341
第四节 区域地下水的有限单元法	347
第五节 井的渗流计算的有限单元法	352
参考文献	359
第十一章 渗流基本参数的确定	360
第一节 确定渗透系数的方法	360
第二节 确定给水度或有效孔隙率的方法	370
第三节 确定单位贮存量与贮存系数的方法	373
第四节 野外抽水试验确定各参数	377
第五节 野外压(注)水试验确定各参数	386
第六节 水平与垂直渗透性不同的确定方法	393
第七节 各向异性的渗透张量	395
第八节 裂隙岩体各向异性参数的野外确定法	401
第九节 反演问题求参数法	410
参考文献	412

第十二章 渗流破坏与控制	414
第一节 渗流问题的重要性与破坏性	414
第二节 渗流控制基本内容	421
第三节 侧岸绕渗的三向渗流控制	427
第四节 闸坝地下轮廓线的渗径长度和合理布局	434
第五节 闸坝基底扬压力与护坦厚度	441
第六节 渗流作用力	446
第七节 孔隙水压力与有效应力	451
第八节 渗透力与孔隙水压力的应用实例	455
第九节 向上渗流的出口临界坡降及其防护	460
第十节 坡面出渗的临界坡降及其防护	463
参考文献	467
第十三章 土的渗透变形及滤层防护	469
第一节 渗透变形的类型及判别方法	469
第二节 渗流自下而上时管涌和流土的计算	473
第三节 接触冲刷和接触流土的计算	478
第四节 渗透变形的部位	480
第五节 粘性土的抗渗强度	481
第六节 软弱夹层的抗渗强度	483
第七节 水力劈裂	484
第八节 滤层的类型和作用	486
第九节 保护无粘性土的排水滤层	486
第十节 保护粘性土的排水滤层	488
参考文献	491
第十四章 土工织物和土工薄膜在渗流中的应用	492
第一节 土工织物滤层排水的应用	492
第二节 土工薄膜防渗的应用	498
第三节 化纤模袋在护坡上的应用	502
参考文献	505
第十五章 土石坝的渗流观测	506
第一节 渗压(或孔隙水压力)观测	506
第二节 渗流量观测	512
第三节 渗流现象的巡回观察	514
参考文献	514
第十六章 观测资料的整理和分析	515
第一节 原始资料的整理和选用	515
第二节 渗压资料的分析方法	520

第三节	渗流量资料的分析方法	523
第四节	渗透系数分析法	525
第五节	综合分析	526
第六节	整理和分析资料的微机方法	528
参考文献		531
第十七章	土石坝渗漏及其处理	532
第一节	土石坝渗漏的形成	532
第二节	铺盖裂缝塌坑渗漏处理	539
第三节	垂直防渗墙处理渗漏	540
第四节	灌浆方法处理渗漏	545
第五节	排水	551
参考文献		553
第十八章	渗漏隐患探测技术	554
第一节	同位素技术在探测病险水库渗漏中的应用	554
第二节	探测渗漏隐患的地电法	562
参考文献		567

第一章 渗流基本理论*

第一节 岩土渗流性质

水或其它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

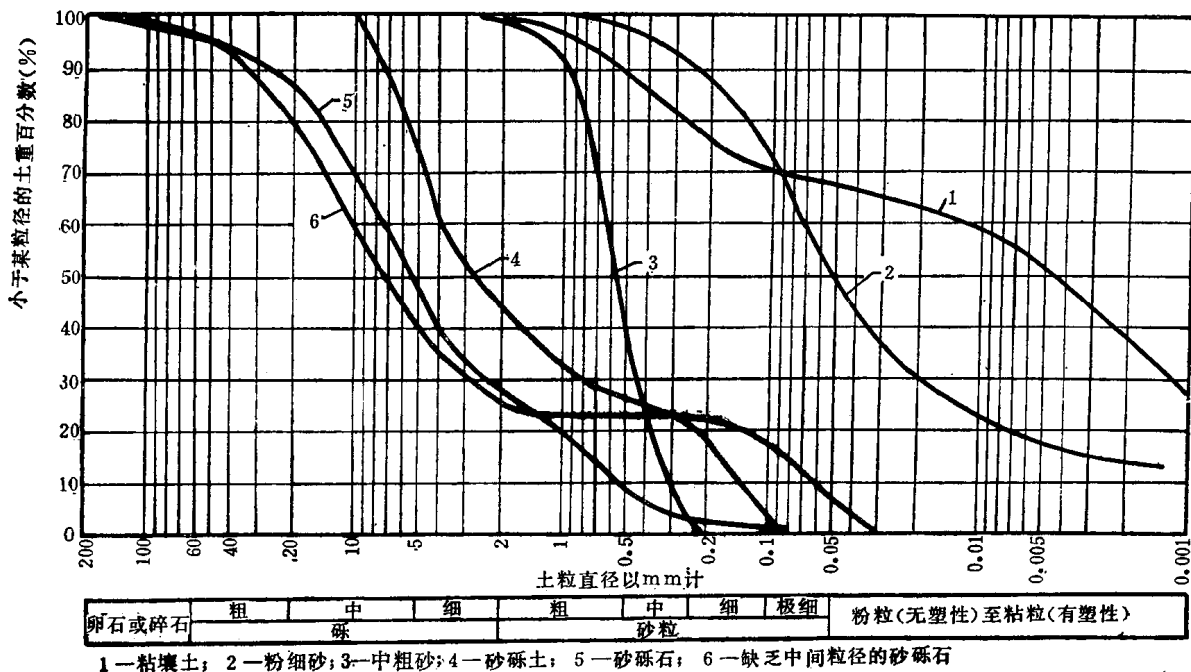


图 1-1 土颗粒大小分配曲线

* 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

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

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）。

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

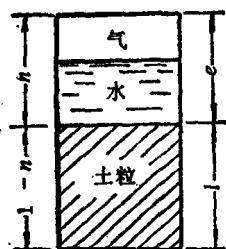


图 1-2 孔隙率与孔隙比示意

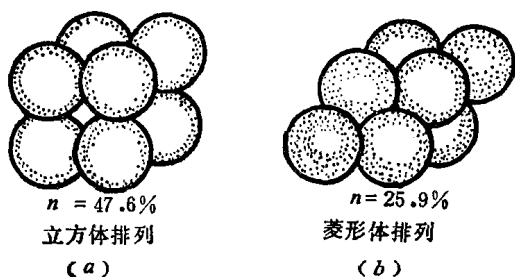


图 1-3 球体排列的孔隙率

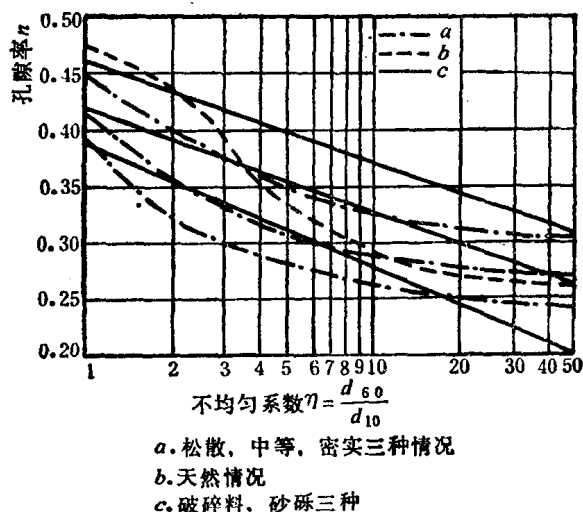


图 1-4 孔隙率与不均匀系数的关系^[5]

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。

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 $d_o=0.414d$ ，菱形排

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	$5 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5}$
粉 质 粘 土	0.45~0.65	0.02~0.05	$\approx 10^{-5}$

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

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

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），以及毛细水等各种形态的水，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

$$n_e = \frac{V_{e0}}{V} \quad (1-4)$$

有效孔隙率影响土的渗透性，其值可参见表1-1。

上式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 $V_{e\mu}$ 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

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

对应于给水度的另一充水有效孔隙率称为饱和和不足度，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。它们在充水浸温过程中，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 $5\sim 6$ 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。

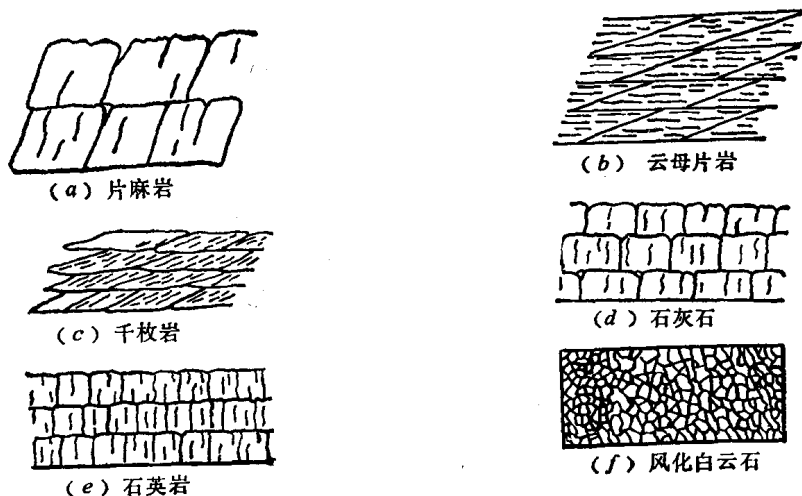


图 1-5 不同岩石的裂隙分布

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
$$v = \frac{Q}{A} = -k \frac{dh}{dS} = kJ \quad (1-9)$$

上式为断面 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, 它是压力水头与位置高度之和, 即

$$h = \frac{p}{\gamma} + z \quad (1-10)$$

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。

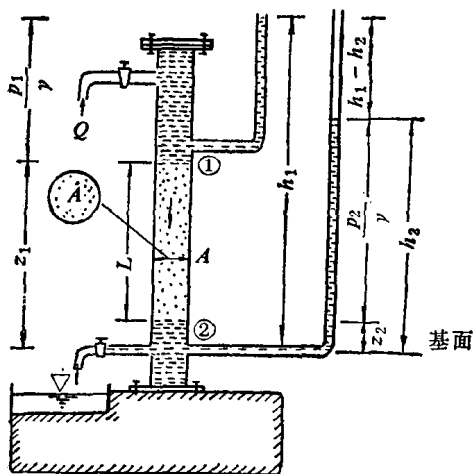


图 1-6 说明达西定律的试验装置

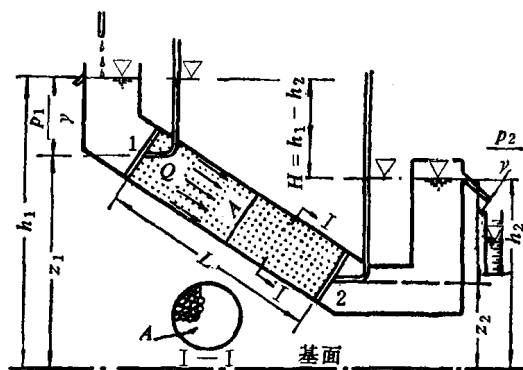


图 1-7 任意倾斜流动的水头示意

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1-8表示垂直向下流动的几种情况: (a) $p_1 > p_2$, (b) $p = \text{常数}$, (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

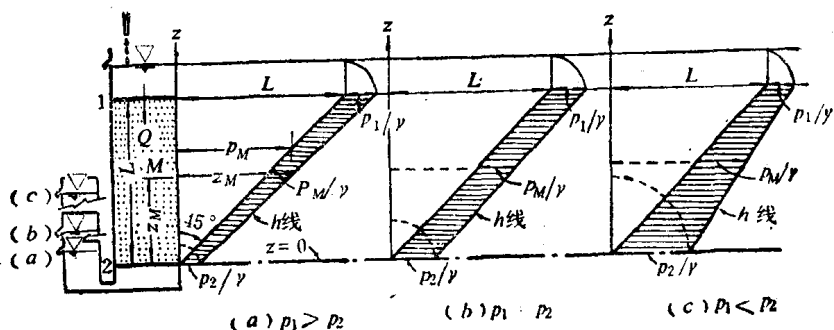


图 1-8 垂直向下流动的沿程压力变化^[4]

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密度， $V = M/\rho$ ，故得 $W = p/\rho$ ；单位质量水的位置由 z_0 升高到 z 所需做的功为 $g(z - z_0)$ 。则总的地下水位势或势能应为二者之和

$$\phi = \frac{p}{\rho} + g(z - z_0) \quad (1-11)$$

若取 $z_0 = 0$ 时，

$$\phi = g\left(\frac{p}{\rho g} + z\right) = gh \quad (1-12)$$

上式与用单位重量水的能量或测压管所表示的式（1-10） $h = \frac{p}{\rho g} + z$ 比较可知只差一个重力加速度 g 的常数项相乘。从最基本的流体力学概念出发，所引导的位势 ϕ ，它和 h 一样都是包括压力和位置高度。不仅说明达西定律是能量表达式，而且其中水头是指测压管水头，不能误认为是压力水头。

达西定律中的流速是指全断面上的平均流速 v ，它与断面上孔隙中的平均流速 v' 的关系应为

$$v = nv' \quad \text{或} \quad v' = \frac{v}{n} \quad (1-13)$$

式中， n 为体积孔隙率，即单位土体中孔隙所占的体积。严格说应为某断面上的表面孔隙率，所幸的是各断面上的孔隙率平均值与体积孔隙率甚为接近，所以就简化了问题。

二、达西定律的推导

达西定律代表线性阻力的渗透定律，它可从多孔介质中层流运动所遭遇的阻力关系推导出来。如图 1-9 所示为沿流线方向 S 取的土柱单元微分体，长为 dS ，断面积为 dA ；作用在单元土柱中流体上的力有三：即两端的孔隙水压力，孔隙水流的自重及水流受到颗粒孔隙道的摩阻力 F [16]。

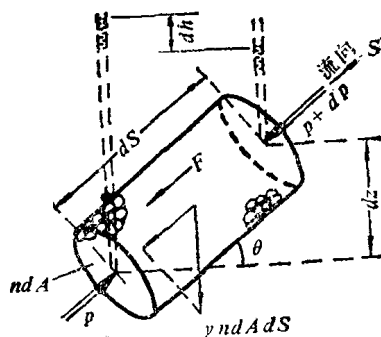


图 1-9 说明达西定律的推导

沿土柱方向写渗流的三力平衡式（略去水流的惯性力）为

$$pndA - (p + dp)ndA - \gamma ndSdA \sin \theta - F = 0$$

因为 $\frac{dz}{dS} = \sin \theta$, $h = \frac{p}{\gamma} + z$, $dp = \gamma(dh - dz)$; 代入上式则得

$$-\frac{dh}{dS} - \frac{F}{\gamma ndSdA} = 0 \quad (1-14)$$

引用司托克斯对于一个颗粒上的层流阻力公式

$$D = \lambda \mu dv' \quad (1-15)$$

式中， D 常被称为拖引力； d 为颗粒直径； v' 为颗粒周围孔隙水沿流向的局部平均流速； μ 为水的动力粘滞性； λ 为一个系数，决定于邻近颗粒的影响，对于无限水体中的圆球 $\lambda = 3\pi$ 。若设土柱中的颗粒数为 N ，并用一个球体系数 β 时（圆球 $\beta = \pi/6$ ），则总阻力应为

$$F = ND = \frac{(1-n)dAdS}{\beta d^3} \lambda \mu dv' \quad (1-16)$$

将上式代入式 (1-14)，并考虑到断面上平均流速 $v = nv'$ 及渗流坡降 $J = -\frac{dh}{dS}$ 时，则得

$$v = \frac{\beta n^2}{\lambda(1-n)} d^2 \frac{\gamma}{\mu} J \quad (1-17)$$

令 $C = \frac{\beta n^2}{\lambda(1-n)}$ ，它只是决定于颗粒的几何形状和排列；故可将上式写为

$$v = Cd^2 \frac{\gamma}{\mu} J \quad (1-18)$$

式中， Cd^2 为公认的本质渗透性，只与多孔介质的组成结构（颗粒大小、形状、排列）有关。若采用达西渗透系数 $k = Cd^2 \frac{\gamma}{\mu}$ ，即得一般的达西定律形式

$$v = kJ$$

这里可知渗透系数 k 具有流速的尺度 (L/T)，它决定于多孔介质的结构 (Cd^2) 和流体的性质 ($\frac{\gamma}{\mu}$) 两种因素。

将达西定律普遍化到各向异性渗透时，可写成下面的一般微分形式