

651

T(147)  
Z38

# 地下水与建筑基础工程

张在明 著



中国建筑工业出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

地下水与建筑基础工程/张在明著. -北京:中国建筑工业出版社,2001.8

ISBN 7-112-04721-8

I. 地… II. 张… III. 地下水—防水—基础施工—研究 IV. TU753.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 035079 号

由于各类工程,特别是高层建筑基础埋深和尺度大大增加,加上过量抽取地下水引起的水位下降,造成建筑基础影响范围内地下水和孔隙水压力分布形态的复杂化。这种情况,对地基基础的勘察、设计都带来了若干亟待解决的新课题。本书从地下水、饱和与非饱和渗流及其数值解的基本理论入手,系统、深入地讨论了地下水及孔隙水压力场对地基变形、承载力、稳定性的影响,论证了在基坑支护设计中应当考虑的有关问题,提出建筑地基抗浮的评价方法。应该说,上述问题都是当前有关领域中的热点与难点问题。

本书的读者包括从事结构设计、工程勘察和岩土工程的技术人员和结构专业、岩土工程和地下工程专业的大专、本科和研究生。相信对他们的勘察和基础设计工作或者专业的学习会有一定帮助。

## 地下水与建筑基础工程

张在明 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京外文印刷厂印刷

\*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:14½ 字数:353千字

2001年8月第一版 2001年8月第一次印刷

印数:3000册 定价:29.00元

ISBN 7-112-04721-8

TU·4203(10195)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本社网址:<http://www.china-abp.com.cn>

网上书店:<http://www.china-building.com.cn>

## 前 言

近十几年来,各类工程,特别是高层建筑的地基基础的勘察、评价和设计问题日益突出。对于高层建筑带来的地基承载力和沉降性状方面的问题,已经引起专家和学者们的高度重视,并逐步得到解决。但是对于由于地下水问题带来的若干新的课题,在工程实践中,工程师们或者是采用传统的保守方法进行评价和设计,或者还没有意识到问题的重要性,使设计存在隐患。这些问题包括:

(1)由于建筑布局和功能上的需要,近年来修建的高层或超高层建筑,在主楼四周往往带有比较低矮的裙房和大面积的纯地下车库,形成所谓“广场式建筑(Plaza)”。北京、上海、西安、大连等很多大城市还修建了为数不少的下沉式广场。这些建筑基础埋置深度较大,结构重量很轻,基础处于补偿或超补偿状态,抗浮问题十分突出。对于抗浮问题的评估,尚没有很好的办法。地下室外墙承载力验算的水压力分布也缺少依据。

(2)由于高层建筑基础宽度较大,基础受压层深度数倍甚至数十倍于过去处理的一般建筑。在此深度内,地下水、渗流场及由此引起的孔隙水压力场的分布形态十分复杂。如北京市东二环、三环至北二、三环及其以外的广大区域在建筑基础影响范围内存在两到三层地下水。望京地区,多达四层。其他城市也多有类似情况。在类似情况下,如不引入地下水动力学和非饱和渗流的概念,有关问题便无法搞清楚,将会影响地基沉降、承载力和稳定性等几乎所有的地基分析评价结果的正确性。而这一问题,尚未引起工程师们足够的重视,工程中使用的数据,很多实际上是不正确的。

(3)深基坑支护的设计与施工中土、水压力分布,缺乏足够的理论和测试依据。

(4)一般建筑工程、市政工程中污水处理场的各类水池、各类地下工程实际上都存在上述问题。

以上这些问题的出现,一方面是由于工程本身复杂性的提高,要求对有关问题的研究更加深入;另一方面,则是由于人类的作用,造成建筑场地环境的变化,引申出若干过去并不存在的,或者在过去既有的课题的基础上滋生出来的新课题。

从土力学与地基基础工程学来看,地下水的问题是早已存在的。自从 Terzaghi 提出有效应力原理以来,孔隙水压力也早已成为土力学中一个十分重要的参数。但是,过去人们处理工程问题时,面临的地下水赋存形态一般比较简单,因此,由地下水产生的孔隙水压力往往呈线性分布,被人们称为“静水压力”,与所谓“超静水压力”相比较,显然不是研究的重点。近年来,由于超量采取地下水,造成了地下水位的不断下降,在此过程中形成了建筑场地的地面下极其复杂的地下水分布形态和变化很大的孔隙水压力场,从而引申出本书讨论的很多问题。

与先进国家相比较,我国从事基础设计和地基勘察评价的技术人员,对本书所涉及的有关知识多不太熟悉。原因是我国专业教育中,课程的设置和教科书的编写,对有关知识还没有给予足够重视。本书作者曾在国外学习、工作数年,对这个问题感触颇深。比如,欧美国家,包括日本和台湾地区研究生使用的主要专业教科书之一,由 Limb 和 Whitman 编写的《土力学》中有很大篇幅涉及地下水、孔压和渗流,以及这些问题对土的特性的影响。我

国有关书籍多是一带而过。觉得有必要强调岩土专业人员对本书涉及的、以及相关的知识的掌握。当然,本书中还不可避免地要涉及到的非饱和土的渗流及孔压问题,则是最近数年中国内外的新成果,更带有推广使用的意义。

在本书的撰写过程中,注重全书的系统性、对工程问题的针对性和对近年来理论和方法发展的介绍。全书共分十章,前三章讨论有关地下水及饱和—非饱和渗流理论,第4章介绍了渗流问题的有限单元解法,第5章结合工程分析的需要,讨论了“独立的”或“原生”的孔隙水压力的产生和分布特性,最后五章分别论述了地下水分布形态和孔隙水压力场对建筑地基变形、承载力、稳定性和基坑支护结构设计的影响,以及基础抗浮的评价方法。为了便于读者对有关问题数值解法的深入理解,在附录中给出一个渗流分析的源程序,并加以适当的解释。

本书的读者可能包括从事结构设计、工程勘察和岩土工程的技术人员和结构专业、岩土工程和地下工程专业的大专、本科和研究生。相信对他们的勘察和基础设计工作或者专业的学习会有一定帮助。

在本书即将出版的时候,作者谨对在本书立意和写作过程中给予大力支持和鼓励的卢肇钧和周镜两位院士致以衷心的感谢,没有他们的指导和鼓励,作者可能没有决心在繁忙的工作中挤出时间写成本书。作者还要对北京市勘察设计研究院环境与水文地质研究所的同事们致以诚挚的谢意。他们在课题研究和日常工作中,对本书涉及很多问题的研究论证加深了作者的认识。在这里还要特别感谢徐宏声、孙保卫和朱国祥等同事,他们为本书提供了若干有价值的基础资料和工程分析实例。在本书的编辑出版过程中,作者与责任编辑咸大庆同志进行了有效和愉快的合作,他的帮助促成了本书的顺利出版。

限于作者的水平,本书中错漏之外在所难免,诚请同行指正。

# 目 录

<b>第 1 章 地下水</b> .....	1
1.1 绪言 .....	1
1.2 水文循环与地下水的分类 .....	2
1.2.1 水文循环 .....	2
1.2.2 饱和带、非饱和带与毛细带 .....	5
1.2.3 地下水的分类 .....	8
1.3 含水层与滞水层 .....	14
1.4 地下水的流动系统 .....	16
1.4.1 稳定流与非稳定流 .....	16
1.4.2 稳定区域的地下水流系统 .....	17
<b>第 2 章 水在饱和土中的流动</b> .....	22
2.1 前言 .....	22
2.1.1 问题的提出 .....	22
2.1.2 基本概念 .....	23
2.2 基本定律 .....	24
2.2.1 土体中渗流的伯努利(Bernoulli)方程 .....	24
2.2.2 达而希(D'arcy)定律和土的渗透系数 .....	26
2.3 渗流方程 .....	29
2.3.1 2-D 渗流方程的推导 .....	29
2.3.2 边界条件和方程的解 .....	30
2.3.3 二维渗流方程的解析解举例 .....	31
2.3.4 二维渗流方程的数值解—差分法 .....	32
2.4 流网 .....	36
2.4.1 什么是流网 .....	36
2.4.2 流网的若干性质 .....	37
2.4.3 绘制流网的要领 .....	39
2.4.4 利用流网进行渗流分析的例子 .....	40
2.5 在非均质土中的渗流 .....	41
2.5.1 问题的提出 .....	41
2.5.2 多层地层中的渗流 .....	42
2.5.3 多层土中的一维流 .....	44
2.5.4 各项异性土中的渗流 .....	46
<b>第 3 章 水在非饱和土中的流动</b> .....	50
3.1 前言 .....	50
3.2 基本概念 .....	51

3.2.1 关于非饱和土 .....	51
3.2.2 非饱和土的应力状态变量和基质吸力 .....	52
3.2.3 非饱和土的有效饱和度与土-水特性曲线 .....	54
3.2.4 非饱和土的渗透系数 .....	57
3.3 液相和气相在非饱和土中的流动 .....	59
3.3.1 液相和气相在非饱和土中是怎样流动的 .....	59
3.3.2 非饱和土中空气的流动和扩散 .....	61
3.4 非饱和土中的稳态水流 .....	62
3.4.1 一维渗流 .....	62
3.4.2 二维与三维渗流 .....	67
3.5 非饱和土中的非稳态水流 .....	68
3.5.1 非饱和土液相的本构关系面 .....	69
3.5.2 非饱和土中的二维非稳定流方程 .....	70
<b>第4章 饱和土与非饱和土中渗流的有限单元解法 .....</b>	<b>72</b>
4.1 有限单元法的应用 .....	72
4.1.1 数学描述 .....	72
4.1.2 边界条件的确定 .....	72
4.2 稳定流的有限单元方法 .....	73
4.2.1 坐标系与结点的选择 .....	73
4.2.2 选择一个函数,用它将单元内任意点的流动势与结点的流动势联系起来 .....	74
4.2.3 将单元内任意点的流动势表示为三角形单元3个顶点流动势的函数 .....	75
4.2.4 用三角形单元3个顶点的流动势来表示单元内任意点的水力坡度 .....	75
4.2.5 流动速率方程的构成 .....	77
4.2.6 结点流量矩阵的建立 .....	77
4.2.7 总体刚度矩阵的建立与边界条件的定义 .....	78
4.2.8 稳定流分析举例 .....	78
4.2.9 稳定流分析的解题技巧 .....	81
4.3 有限元的加权残余解法(Method of Weighted Residuals) .....	84
4.3.1 前言 .....	84
4.3.2 加权残余法的步骤 .....	85
4.4 非稳定流的有限元解法 .....	88
4.4.1 前言 .....	88
4.4.2 非稳定流的有限元解法 .....	89
<b>第5章 土体中孔隙水压力 .....</b>	<b>93</b>
5.1 孔隙水压力与有效应力的基本概念 .....	93
5.2 水文环境及建筑条件的变化与孔隙水压力的分类 .....	95
5.2.1 水文环境的变化及其对工程的影响 .....	95
5.2.2 高层建筑工程分析评价的需求 .....	98
5.2.3 孔隙水压力的分类 .....	100

5.3 超孔隙水压力 .....	102
5.4 渗流孔隙水压力(渗流孔压) .....	103
5.4.1 由渗流引起的孔隙水压力变化 .....	103
5.4.2 渗流孔隙水压力与压力水头 .....	107
5.4.3 建筑场地渗流孔隙水压力的分布 .....	108
<b>第6章 对建筑地基变形分析的影响 .....</b>	<b>113</b>
6.1 前言 .....	113
6.2 由基底压力引起的土中应力分布与常用沉降计算方法 .....	114
6.2.1 土中应力分布的布氏解 .....	114
6.2.2 沉降计算的叶果洛夫法 .....	115
6.2.3 沉降计算的分层总和法 .....	117
6.3 地下水的分布对沉降计算的影响 .....	118
6.3.1 概述 .....	118
6.3.2 土体中的有效自重应力 .....	118
6.3.3 孔隙水压力场对模量试验及结果的影响 .....	121
6.3.4 孔隙水压力场对地基变形计算深度的影响 .....	122
6.4 地基沉降计算实例 .....	123
<b>第7章 地下水对地基承载力的影响 .....</b>	<b>129</b>
7.1 前言 .....	129
7.2 常用承载力公式 .....	130
7.2.1 规范采用的承载力公式 .....	130
7.2.2 刚塑体假定下承载力公式的建立 .....	130
7.2.3 Terzaghi 下限解及规范中对其思路的应用 .....	134
7.2.4 弹塑体假定下承载力公式的建立 .....	136
7.3 地下水对地基承载力的影响 .....	138
7.3.1 概述 .....	138
7.3.2 地下水位的最大影响深度 .....	139
7.3.3 地下水对两规范影响的比较 .....	142
7.3.4 地下水位对高层建筑地基承载力评价的影响 .....	145
7.3.5 工程实例分析 .....	145
<b>第8章 地下水对建筑地基与边坡稳定性分析的影响 .....</b>	<b>149</b>
8.1 前言 .....	149
8.2 圆弧滑动法的原理及研究进展的综述 .....	150
8.2.1 边坡稳定分析方法及其进展 .....	150
8.2.2 圆弧滑动条分方法的原理及常见方法比较 .....	151
8.3 孔隙水压力分布对边坡稳定性的影响 .....	159
8.3.1 问题的概述 .....	159
8.3.2 影响分析 .....	161
8.4 孔隙水压力分布对建筑地基稳定性的影响 .....	165

8.4.1 问题的概述	165
8.4.2 影响分析	166
<b>第9章 对基坑支护结构的影响</b>	<b>171</b>
9.1 前言	171
9.1.1 概述	171
9.1.2 基坑支护的作用与极限状态	173
9.1.3 地下水对基坑工程影响的概述	174
9.2 地下水的影响分析	175
9.2.1 对作用于支护结构上的水平荷载的影响	175
9.2.2 地下水与基底抗隆起稳定性	182
9.2.3 地下水与支护体系的整体稳定性	183
9.3 工程实例分析	184
9.4 施工降水	188
9.4.1 与本章有关的问题	188
9.4.2 一种降水分析程序	189
<b>第10章 建筑抗浮验算</b>	<b>193</b>
10.1 前言	193
10.2 最高水位的预测	194
10.2.1 预测方法概述	194
10.2.2 地下水位动态预测的时间序列自回归——滑动平均模型[ARMA(n,m)模型]	199
10.3 工程实例	201
10.4 对“抗浮水位”概念的讨论	203
<b>附录A 渗流分析程序</b>	<b>205</b>
A.1 程序框图	205
A.2 源程序	206
<b>参考文献</b>	<b>221</b>



# 第 1 章 地 下 水

## 1.1 绪 言

对于从事岩土力学研究与地基基础工程的勘察、设计、施工、监测人员来说,有关地下水的问题始终是一个及其重要的课题。

20 世纪中期以后,随着第二次世界大战后全球范围内工程建设大规模的开展,特别是若干有代表性的超大规模的建设项目的实施,对传统的土力学及地基基础专业提出了新的要求,使这个古老的专业向“岩土工程”转化。

其实“岩土工程”这个名词,在此前大约 20 年左右已经在土力学的鼻祖 Terzaghi 的著作中已经出现了,后来的英文名词是“Geotechnical Engineering”。从土力学及基础工程向岩土工程这一转化可以以“国际土力学及基础工程学会(International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering)”更名为“国际土力学及岩土工程学会(International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering)”,以及美国材料试验学会(ASTM)的著名刊物“土力学与基础工程”更名为“土力学与岩土工程”为标志。20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期以后,由于建设需要的推动,政府的促进和行业从业人员的努力实践,这种转化过程在我国也取得了明显的进展。

所谓“岩土工程”,台湾地区的译名是“大地工程”,按照我国大百科全书的定义,是以工程地质学、土力学、岩石力学及地基基础工程学为理论基础,来解决和处理在建设工程中出现的所有与岩体和土体有关的工程技术问题的一门学科,是与地学与工程学紧密结合的新的专业学科。属土木工程范畴。

从上面的定义看,将“Geotechnical Engineering”译为“岩土工程”其实也不是十分贴切的。不管如何,这个专业学科的研究或者工作内容,应该包括以下的方面:

1. 岩土体的构造特征及其物理力学性质。在某些工程条件下还要研究其化学性质;
2. 岩土体在受到外来的工程作用或环境影响以后的短期和长期反应。如承载作用的发挥,变形大小及其性质,以及岩土体的稳定性等等;
3. 岩土体对工程结构施加的作用:
  - 力学方面的,如对地下室外墙和支挡结构施加的土压力,对地下结构的浮力,地震或其他动力荷载的输入等;
  - 化学方面的,如对地下结构构件的腐蚀等;
  - 物理—化学方面的,如特殊性岩土由于环境变化造成的膨胀或湿陷对工程结构施加的作用等等;
4. 岩土体与结构物的相互作用,主要是指由于二者的变形连续条件造成对它们在同一空间域和时间域内各自性状的约束,以及由此对工程施加的影响。这是当前在高层建筑地

基基础和深基坑设计中的一个热点课题；

5. 按工程的要求对岩土体性状的设计和改造等。

在以上几个方面的工程实施中大都包含着勘察、设计、施工、监测与监理五个方面的工作。

分析以上的内容,可以立即看出,虽然在任何方面都没有出现“水”或者“地下水”这个名词,但是水的作用几乎渗透在每个方面,起着及其重要的影响。从这个意义上说,如果有人将“岩土工程”概括为“岩+土”的学科,或者“岩+土+工程”的学科,由于忽略了“水”的影响因素,都是不正确的,起码是不全面的。与先进国家相比,我国在岩土工程的学科建设和工程实施中对地下水的作用的认识是远远不够的。

简单地说,首先,地下水作为岩土体的组成部分,直接影响岩土体的性状和行为;同时,地下水又是工程环境的重要组成部分,地下水的赋存状态与渗流特性将对工程结构承载能力,变形性状与稳定性、耐久性施加影响。我们的工程师和学者们似乎应该建立这样一个概念:地下水是岩土工程或者基础工程这个舞台上的一个主角。在本书后面的章节中,正是要讨论与此有关的问题。

为了以后讨论的方便,本书第1章将很简要地给出有关地下水必要的宏观概念与基本知识。

## 1.2 水文循环与地下水的分类

### 1.2.1 水文循环

关于“地下水”,我们还是引用著名学者 R. A. Freeze 和 J. A. Cherry(1979)的定义,即“地下水”一词一般用来指“出现在已经充分饱和了的土层和地质层组中的地下水位以下的水体”。

对于这样一个传统的定义,有两点需要说明。

第一,由于本书的目的不是对水资源或者水环境的专门研究,而是讨论地下水与建筑工程之间的关系,因此,重点是放在浅层地下水的赋存状态与渗流特性上。此处所谓的“浅层”,并没有一个十分严格的界限,一般是指基础影响范围以内,或者对基础进行力学分析所需要了解的范围之内所包含的水文体系。当然,研究的深度同时也要考虑研究区域地下水的分布特征。由于高层建筑的兴建,基础的宽度往往比较大,埋置较深,基底压力也大于一般建筑,因此基础的影响深度也相对较大。比如在作者对北京地区进行的研究中,涉及的深度大体在地表下 30m 或更深一些的范围。这一点与过去从工程角度研究地下水的传统侧重也是一致的;

第二,近年来,非饱和土力学的发展及其在工程中的应用技术日趋成熟。按照《非饱和土土力学》的作者之一 Fredlund(1997)教授的说法,非饱和土力学,作为土力学的一个重要的独立分支,其日趋成熟的表现主要在四个方面:第一是有了一套比较完整的理论;第二是具备了在室内外进行参数测定的方法;第三是建立了一系列有关问题的工程评价方法与标准;第四是出现了若干便于使用的计算程序,重要的程序已有商业化版本,在非饱和土环境中的渗流对基础工程的影响越来越受到人们的重视。因此,本书将涉及饱和土体之外,地

下水位以上(有时是在两个含水层之间)的非饱和渗流问题。

对水文循环的研究,是一个非常古老的课题。其实,这方面的研究是从地下水的来源开始的,人们的认识经历了一个十分有趣的过程,此处不妨进行一点简要的回顾。

Vendl 在 1968 年对早期人们对地表水体和地下水的认识做了很好的概括。

按照他搜集的资料,早在公元前 7 世纪,地球上的水是从哪里来的这个问题就引起了人们的注意。当时的 Thales 认为,是风的力量使海里的水进入陆地地层,然后,由岩体巨大的重力,将水抬挤到地面。

公元前 4 世纪,Aristoteles 将对水的起源的认识提高了一大步。他认为,大部分的地下水都是那里的水蒸气凝聚形成的,也有一部分是由于雨水通过土层渗入,并聚集到岩洞中。他的贡献在于,第一次指出降雨时水的来源是太阳使地表的水蒸气升上空中,而且第一次用了“气象(Meteorology)”这个词来讨论有关的现象。

公元前一世纪,Pollio 已经相对正确地形成了水文循环的概念。他指出,太阳使地球上河流和海洋里的水上升,形成云。由于云层和山体的“撞击”,使云层的含水变成雨水洒向地面,地面的水再一直渗入到岩层、矿层或隔水粘土层上,沿着这些层面聚集起来直到上升至地面。他认为,这便是地下水和泉水的来源。

如果用“瞎子摸象”来比喻在当时的科技水平上人们对一种客观事物的研究和把握的话,与几乎同时代的 Seneca 相比,Pollio 显然已经“摸”出了“象”的大概轮廓。Seneca 在自己家的葡萄园中做了一个试验,结论是雨水渗入地下的最大深度最多不过 10 英尺,因此地下水只能是由地下土层本身含有的空气经过高压聚集而成的,而高压来自于“巨大的黑暗”。Seneca 恰恰是用自己也许是有一定意义的试验将自己引入歧途。我们在研究这一段有关地下水的科技史的时候,认真对待这个例子也许是有一定意义的。

可能是由于问题过于巨大和宏观,也可能是由于问题的非直观和难以定量的特征,在此后千余年间,对地表水和地下水的研究和认识并没有取得任何突破性的进展。直到 17 世纪中期,P. Perrault(1608~1680)和 E. Maritte (1620~1684)的工作才被今天人们公认为奠定了现代水文学的基础。他们的共同点是对雨水的入渗和入渗量与水井积水量之间的关系进行了比较系统的定量研究。前面说,“被今天的人们公认”,是因为直到 20 世纪初,他们比较正确所认识还一直受到不同研究者的非难与质询。

当代关于水的形成的理论主要有两种。

较早期者的理论可称为“传统理论”,认为在地球的早期发展阶段,其固体表层常常被其内部具有极高温度的物质和气体冲破,气体的成分主要是水蒸气和二氧化碳,它们扩散在大气层中。经过相当的时间,当温度降低到某一临界值以下,水蒸气凝聚,变成雨水降落。

第二种理论是 Turville 等人的所谓“太阳理论(Solar Theory)”。“太阳理论”认为太阳风形成的微粒辐射将非常大量的氢原子送临地球,在那里经过氧化作用形成水。这种理论被一个重要的事实所支持,就是由上述原因产生的“太阳水”的生成水量应该是  $1 \sim 2\text{m}^3/\text{d}$ ,而今天地球拥有的总的海水量正好与按此理论用地球的起源时间计算得到的总水量大体相符。“太阳理论”并不反对“传统理论”,只不过认为,地球上只有少部分的水是由于“传统理论”所描述的原理产生的。

象地球起源一类问题一样,尽管水是我们每天接触、大量存在的物质,科学家们对它的

起源和生成仍然有不同的理论或假说。但是从研究水文循环的角度考虑,科学家们比较一致的看法是,与上述两种理论大致对应,可以将水按其起源和位置分成两类:

——岩浆水(Juvenile Water),以蒸汽的形式存在于液态的岩浆中,在火山爆发时冲破地球表面的硬壳,达到地面并开始冷凝;

——渗流水(Vadose Water),不管由哪一种原因产生的水,凡是今天参与水文循环的水,都可称为渗流水。

从岩土工程的角度出发,我们关心的当然是后者。

水文循环是一个十分复杂的过程,日复一日地在海洋、大气和陆地之间不间断地进行。对于整个水文循环过程,土木工程师们所关心的主要还是其中的陆地部分。

水文循环的陆地部分可由图 1-1 和图 1-2 简要说明。

图 1-1 表示某个流域的水文循环。

对于特定的流域来说,入流由大气降水形成,包括以雨或雪的形式达到地面的降水,构成流域的“输入”。

流域的出流或“输出”主要由两部分构成:第一,出流表现为河流或径流(run-off);第二,蒸散发。包括裸露水体的蒸发、土壤表面的蒸发、以及植物在土壤中生长时的散发等。

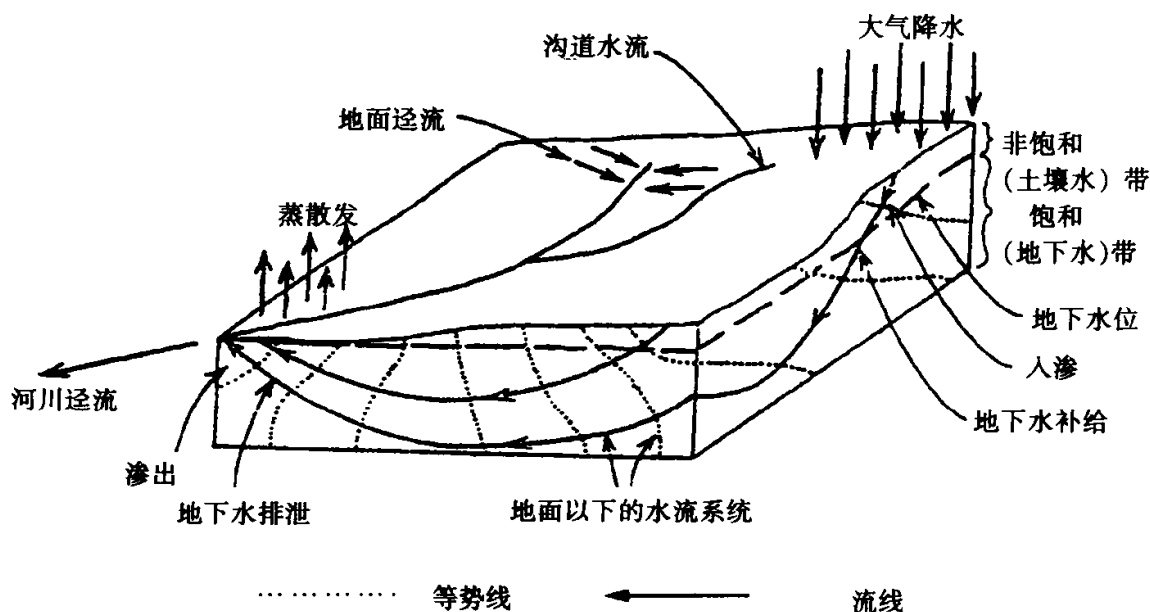


图 1-1 水文循环示意

为了更深入地了解从入流到上述第一种出流——由河流或径流的输出过程,让我们来看一个支流流域的局部循环过程(图 1-2)。雨降到山坡表面以后是从 3 种不同的路径到达溪流的:

第一是从地面直接流向溪流,称为“坡面流”。坡面流这种看似非常简单的现象,实际是陆地表面的一种复杂的水文过程。对坡面流量的估计取决于地表土壤的类型、非均匀性及降雨在时间和空间上的分布规律。研究表明,流域的某些地段对河流按照某种规律提供一定数量的坡面流,而其他某些地段的坡面流则可忽略不计。对于生态环境较好的情况,在整个流域中,大多数坡面流对河流的输出产生于很小的面积内,通常不超过流域总面积的 10%,在很多情况下甚至更少一些。并且在这些局部面积上,也只有 10%~30%的降雨

量变为坡面流。除了气象、地形地貌条件之外,流域面积的植被情况对坡面积影响很大。由于坡面流可能造成坡岸的冲刷和河流含泥沙量的提高,对坡面流的控制是环境保护中一个重大的课题;

第二种途径称为“壤中流”。壤中流是指降到坡面的水通过渗透性较高的地表土层、农业耕作层或者森林碎屑层流到渗漏面,并流向溪流的水流。Freeze 的研究证明,在表面层渗透性较高的凸形山坡地段,壤中流可以成为在数量上占优的径流组成部分;

第三种便是深入到地下水位以下,通过地下水流输出到溪流的那部分水流。

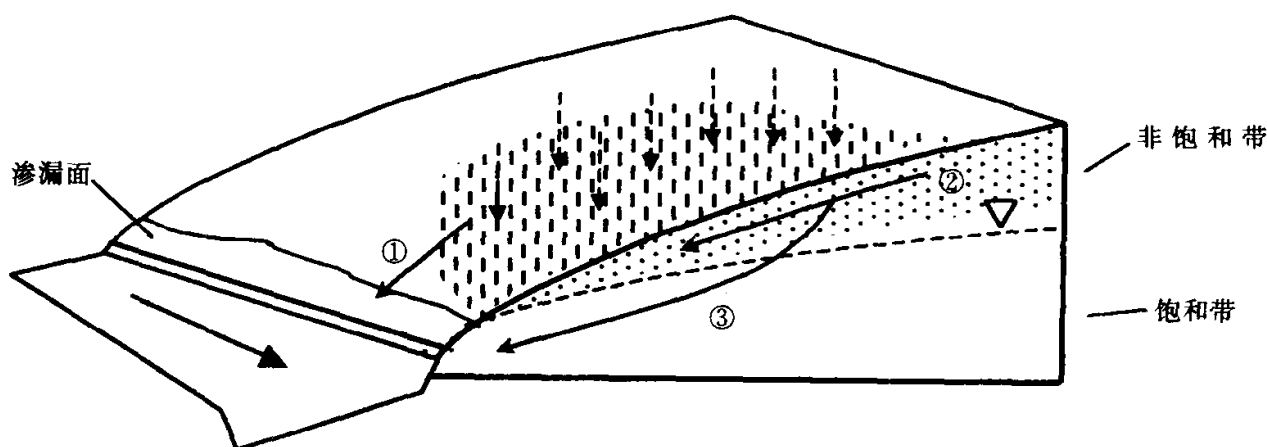


图 1-2 支流流域中山坡向河流供水示意

①坡面流;②壤中流;③地下水流

上述三种途径对河流输出的比例,取决于很多因素,比如气候、地形地貌、地层结构、土壤、植被和土地利用情况,在世界各地、国内各条河流的流域,甚至一个流域的不同部位都是不同的。在进行河流整治工程或某些水工工程时,针对性的研究和数据的积累必不可少。

在上面的讨论中,我们可以建立这样一个概念,即一个流域应该被定义成地表排泄区以及区域的地表下的土壤,加上土壤下面地质层组的综合体,而不仅仅是地图上的某一块面积。这个概念对于土木工程师来说,无疑是重要的。

上面分析的水文循环系统可以用图 1-3 比较形象地说明。

### 1.2.2 饱和带、非饱和带与毛细带

根据前面的定义,知道地下水是指出现在已经充分饱和了的土层和地质层组中的地下水位以下的水体。那么,在进行地下水分类之前,有必要讨论一下有关地面下水分的赋存方式和地下水位是如何形成的这样一类问题。

从图 1-4 可知,地面是一种地下水输入和输出的界面,从渗流角度可以称为流量边界(Flux Boundary)。一般情况下,在地面下的浅层区域,土体是非饱和的,称为非饱和带。地下水的蒸发和入渗是以非饱和渗流的方式实现的。所以非饱和带也称为“渗流带(Vadose Zone)”,传统上则称为“包气带”。Freeze 等人(1979),将非饱和带的特性归纳如下:

1. 它存在于水位以上,且在毛细带以上;
2. 土体的孔隙中仅有一部分充满了水,因此,土的体积含水量  $w <$  土的孔隙度  $n$  ;
3. 流体的压力低于大气压力,孔隙水压力为负值。从后面的讨论中我们将了解到,土

体中存在着基质吸力(Matric Suction);

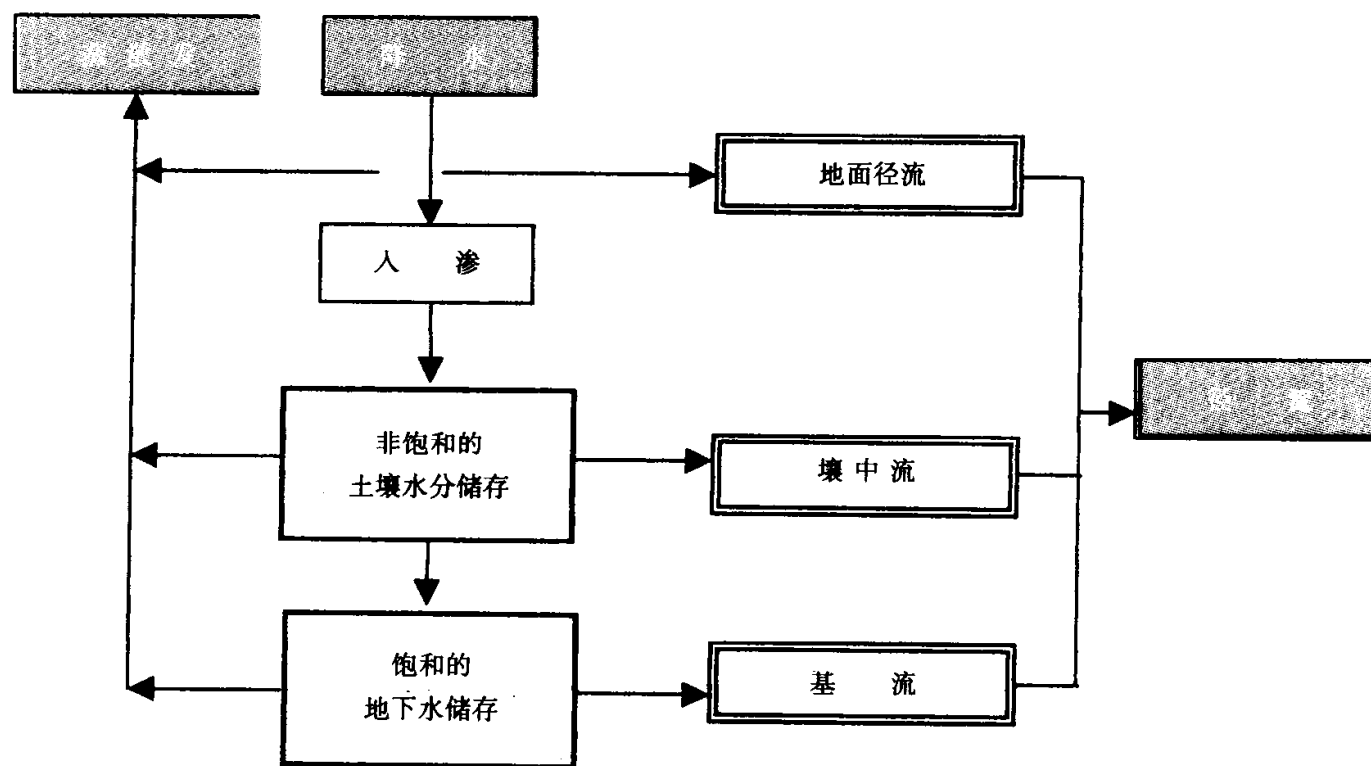


图 1-3 水文循环系统示意

4. 土体中的压力水头必须用张力计或基质吸力计来量测;

5. 即使对于同一种土来说,渗透系数也不是常数,而是含水量的函数。土在非饱和状态下的渗透系数大大小于饱和状态时的值,含水量越低,渗透系数越小。

在图 1-4 中,地下水位以下是饱和带。地下水位是一个十分常见的名词,非专业人员也大概知道它的意思。其实,地下水位还是有它的定义的。一般说,地下水位是指这样一个面,在这个面上,土体的孔隙水压力或流体的压力水头都正好等于零。

从这个定义出发,饱和带有以下性质:

1. 它存在于地下水位以下;
2. 土体的孔隙被水充满,因此,土的体积含水量  $w$  等于土的孔隙度  $n$ ;
3. 随着深度增加,流体压力大于大气压力,压力水头大于零;
4. 水力水头可以用地下水位计或者孔压计来量测;
5. 对于同一种土来说,渗透系数是一个常量。

从图 1-4 可以看到,在饱和带与其上的非饱和带之间,存在一个毛细带(Capillary Zone),在此区域内,土中的水是靠毛细张力来维系的,因此,即便是在靠近水位的一定高度范围内可能处于饱和状态,其孔隙水压力亦为负值,不能形成自由水面。

不管从含水量变化或者孔隙水压力分布状态来看,毛细带的性状都是很复杂的。由于近年来很多城市的地下水位都有降低趋势,建筑基础可能直接置于毛细带上,或者毛细带在基础的影响范围之内,但是对毛细带物理力学特性的研究似乎并没有引起人们足够的重视。应该说,到目前为止,人们还没有充分了解毛细带的某些性质。

由于毛细现象,土中的水在地下水位以上究竟能升多高,这是一个经典的课题。Zunker

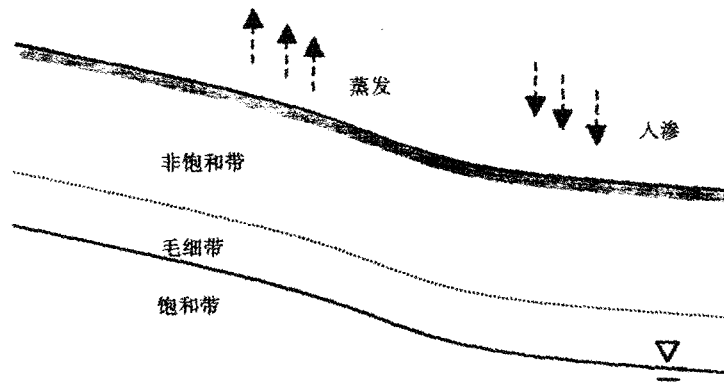


图 1-4 地下水按含水特征的分区

(1930)在 30 年代就根据他的研究,提出了一个简化公式:

$$h = 0.298 \cdot e \frac{1}{\eta d_s} \quad (1-1)$$

式中  $e$  —— 土的孔隙比;  
 $d_s$  —— 土的有效粒径;  
 $\eta$  —— 性状系数,与土的颗粒性状有关。

这个公式看来十分简单,后来的试验表明,它的适用范围也是有限的,但却说明了一个问题,即土中的毛细上升高度土的孔隙比与土颗粒的性状有关。这一点应该是正确的,与 Terzaghi(1934)早年的研究结论也是基本一致的,毛细现象的最早的研究者已经表明,在细管中毛细水升高的高度仅与水的表面张力和管的直径有关。

土中的毛细现象毕竟要复杂许多,Valle - Rodas 曾对均匀砂进行过开口管和毛细管试验,试验表明,均匀粉砂的升高高度可以超过 60cm,细砂超过 35cm~50cm;Krynine 的试验表明,粉土的升高可以超过 1m;Sitz 则指出,在粘性土中毛细水可以上升到地下水位以上大于 10m 的高度(Rethati, 1983)。

如果将已有的研究做简单的归纳,可以得出如下的看法:

1. 毛细水的上升高度与土的级配和土颗粒的大小有关,在粘性土中,上升高度较大;
2. 在毛细水的上升过程中,随着高度的增加,含水量不断降低,从土的分带说,从毛细带逐步过渡到非饱和带,两个带之间看来并不存在一个绝对的界面。也就是说,从含水量的角度看,在整个毛细带中情况是不一样的。比如,Sitz 曾经建议,将毛细水区的水分为重力毛细水和分子毛细水。他认为,重力毛细水具有与普通水相似的性质,而分子毛细水的性质则不相同,它能够承受很大的拉应力而不发生孔蚀或沸腾。然而,不管含水量如何变化,在毛细带中,孔隙水压力总是负值;

3. 毛细滞后(Capillary Hysteresis)现象是在毛细现象的理论研究中发现的,在土体中也存在这种现象。其表现之一如图 1-5 所示。

图中的横坐标表示土的饱和度,变化幅度从 0 到 1;纵坐标表示从地下水位往上的高度。曲线 A、B 分别表示两种不同的毛细过程:

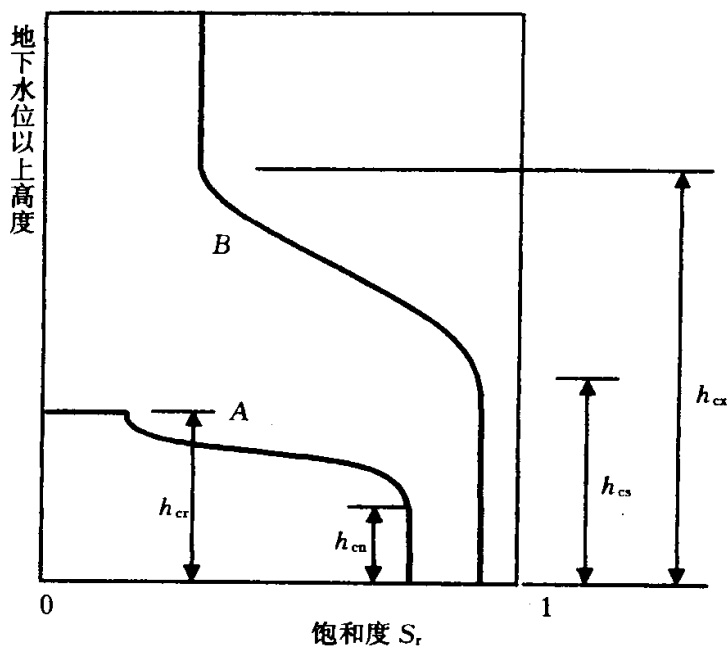


图 1-5 毛细升高与含水量变化示意

曲线 A 代表土体的初始状态比较干燥,初始含水量比较低的情况,此时如发生毛细现象(比如地下水位升高,使毛细带向上发展),土的饱和度在地下水位以上并不很远的范围( $h_{ca}$ )以上,就开始迅速降低,并且在达到一定高度( $h_{cr}$ )时可以趋近于零;

曲线 B 所代表的情况相反,它描述了土在初始饱和度已经比较高的条件下的毛细现象发展过程。在地下水位以上相当范围内( $h_{cs}$ )毛细带内土的饱和度并不降低。在这个高度以上的某一范围( $h_{cx}$ 以下)饱和度  $S_r$  保持降低的趋势,但不会降得很低,不会降到零。再往上,则饱和度不再降低,在毛细带基本上保持一个常

量。换句话说,毛细带的土在湿化和干燥过程中,毛细上升高度-饱和度  $S_r$  的关系曲线是不重合的。这一点的非饱和土的研究当中非常重要,在本书后面的讨论中,我们将看到,与这种现象类似,描述非饱和土的一种重要性质的“土-水特性曲线(Soil-Water Characteristic Curve)”也有类似特性。

图 1-4 表示的是一个最简单的典型条件下非饱和带-毛细带-饱和带三个区域的划分。近二三十年来由于地下水的超量开采,在很多地区,特别是工业区和大城市范围。地下水位下降明显。在水位下降过程中,受地层分布的影响,往往形成多层地下水。各含水层之间同样出现了饱和带和毛细带,在地面以下可以形成这三个带多重组合的复杂形态。在本书的后面,我们将讨论饱和带与非饱和带多重组合对地下水渗流形态造成的影响,以及由此形成的孔隙水压力场对建筑地基分析评价到来的问题。

我们在下面进行的地下水的分类,是对饱和带水体的分类。

### 1.2.3 地下水的分类

在研究地下水漫长的历史中,人们从不同的着眼点对地下水的分类提出过很多不同的方法,这些方法在以后的深入研究中又经过不断的演变。所以,对地下水的分类,应该看成一个发展的过程,而不是一成不变的。最常见的分类有:

- (1)按水位的深浅分类;
- (2)按气象条件造成的水位年变度化规律分类;
- (3)按赋存条件分类等等。

#### 一、按水位的深浅分类

按水位深浅的分类,实际上与水的补给条件有关。在此前提下,20世纪中期以前,分类的原则比较机械。当时的分法是:

- (1)雨水直接补给类型,地下水位一般在地表下 0~1m 年变幅不大;
- (2)地表入渗型,地下水位一般在地表下 1~2m,年变幅比前一种稍大,水文平衡也较



前者为好;

(3)平均常规型(Average Normal Type),水位一般在地面下 2~4m,砂类土的年变幅在 0.5~0.7m;粘性土在 0.7~1m 左右;

(4)较深常规型(Normal Type of Greater Depth),地下水位在 4m 以下,有时可深至 7~10m,年度的最高和最低水位可能滞后于气象变化;

(5)非干扰型(Undisturbed Type),水位在 7~10m 以下。此时直接的人渗和蒸发已经基本不是对水位干扰的因素,水位变化取决于水平的补给与排泄。

20 世纪 60 年代以后,以 Kovacs(1974)为代表的一些学者对上述分类方法从入渗、蒸发与横向补给、径流之间的动力平衡(Dynamic Equilibrium)原理进行了半经验的定量补充。具体做法如下:

第一步,从地表下  $m_0$  (m)处实际观测得到的年平均入渗量  $B_0$  (mm)推知距地表任意深度  $m$  处的年平均入渗量  $B$  :

$$\frac{B}{B_0} = e^{0.4(m_0 - m)} \quad (1-2)$$

这是一个统计公式,试验是在  $m_0 = 2\text{m}$  的条件下进行的。该公式适用于地表下 1m 以下的深度。从地表到地表下 1m 之内的范围,可以用一条二次抛物线另行描述。

第二步,同样道理,可以从地表下  $m_0$  (m)处实际观测得到的年蒸发量  $E'_0$  (mm)推知距地表任意深度  $m$  处的年平均蒸发量  $E'$

$$\begin{cases} \frac{E'}{E'_0} = e^{(m_0 - m)}, m > 1\text{m} \\ \frac{E'}{E'_{01}} = 10^{\alpha(m_0 - m)}, 0 > m \geq 1\text{m} \end{cases} \quad (1-3)$$

第三步,对于年平均水位基本保持不变的情况,可以写出持水平衡方程:

$$B - E' + (T_{in} - T_{out}) = 0 \quad (1-4)$$

式中,  $T_{in}$  为横向补给,  $T_{out}$  为横向径流,单位都是 mm。从式中看出,横向补给  $T_{in}$  和横向径流  $T_{out}$  也是深度的函数。

第四步,根据式(1-4)作出图 1-6,并按图示条件进行分类。图 1-6 是欧洲中部某区域的一个例子,能够十分清楚地说明分类的原理。

图 1-6 的横坐标表示  $T_{in} - T_{out}$ ,负方向说明径流大于补给,年平均水位保持基本不变,入渗就要大于蒸发;正方向则正好相反,补给大于径流,所以蒸发量大于入渗量。图中的纵坐标表示从地面向下的深度。图中的曲线表明不同深度补给与径流的关系。

沿竖向自上往下,图中的①区位于地表下 1m 的范围,直接接受雨水入渗,属于前面的雨水直接补给类型,不同季节水位变化大,曲线不典型;

图中的②区,在地表下 1~5m 左右的范围内,是典型的在入渗—蒸发和补给—径流四种作用的平衡区域。一般情况下,该区域都可分成上下两段。在本例中曲线与纵坐标轴正好交于 2m 附近,说明 2m 以上横向补给大于径流;  $E' > B$ ,蒸发量大于入渗量;2m 以下  $E' < B$ ,入渗量大于蒸发量。

需要注意的是在地表下大约 2m 处,年蒸发量与入渗量保持平衡,称为平衡深度(Equilibrium Level),水位在 2m 左右时,横向的补给与径流影响不大,或者是二者基本平衡,或者