

大坝工程渗流力学

Seepage Theory for Dam Engineering

柴军瑞 著

西藏人民出版社

内 容 提 要

本书内容涉及到大坝工程渗流力学的主要最新进展。前两章简要介绍了渗流力学基础和大坝工程渗流力学概况。第3章至第8章系统地介绍了作者近年来在大坝工程渗流力学方面较新的研究成果,首先讨论了坝基裂隙岩体渗流力学基础及大坝渗流分析与控制理论,接着论述了渗流与应力、渗流与温度的相互作用关系,然后介绍了渗流场与应力场耦合分析、渗流场与温度场耦合分析的数学模型及解法,最后给出了工程应用实例。

本书可供水工结构工程、岩土工程、土木工程、水文地质、工程地质、采矿工程、油藏工程等方面的专业技术人员参考,也可作为高等院校相关专业高年级大学生和研究生的参考用书。

ABSTRACT

The book involves the main recent progress on seepage theory for dam engineering. The fundamentals for seepage theory and seepage theory for dam engineering are briefly introduced in the first two chapters. The rest six chapters are mainly the systematical summary of recent research achievements by the writer. The basic seepage theory for fractured rock mass of the dam foundation, the dam body and the seepage control measures are discussed, then are proposed the interactions between seepage and stress, seepage and temperature. The mathematical models and their solution methods for coupled seepage and stress fields, coupled seepage and temperature fields are also introduced, finally are given the examples of engineering application.

The book is intended for scientific researchers and students of higher learning engaged in hydraulic structure, geotechnical engineering, civil engineering, hydrogeology, engineering geology, mining and oil engineering.

前 言

进行大坝工程建设是人类“除水害、兴水利”的主要措施之一。随着人类社会的不断发展，大坝工程建设的规模越来越大，面临的技术难题也越来越复杂。高坝工程建设是复杂的系统工程问题，解决这些技术难题必须综合应用当代科学技术的最新进展。

由于大坝工程的工作特点，渗流力学研究已愈来愈多地受到大坝工程设计与研究人员的重视。尽管如此，因岩土介质渗流机理的复杂性，在国内外许多已建大坝的坝基或库区边坡体中常出现这样或那样的渗流问题。事实表明，岩土介质中渗流场所固有的长期连续变异的特性往往会直接困扰乃至危及大坝工程的建设和运行。据统计，90%以上的库区边坡体破坏和地下水动态有关，约三分之一的大坝失事是由渗流引起的。如 1959 年法国 Malpasset 拱坝的溃决和 1963 年意大利 Vajont 拱坝库区的大滑坡都是渗流导致工程失事的典型实例。随着高坝工程建设规模的越来越大，渗流力学研究显得尤为重要。

从 1993 年起，作者在攻读硕士学位期间、攻读博士学位（包括出国进修）期间、博士后研究期间，先后连续地进行了与大坝工程渗流力学有关的研究工作，本书就是作者这些年来研究工作的系统总结。鉴于篇幅所限，本书在第 2.4 节里只对可能查阅到的大坝工程渗流力学方面的文献进行了综

述：第3章至第8章只详细地介绍了作者近年来在大坝工程渗流力学方面较新的研究成果，各章节相互联系，又具有一定的相对独立性，适合于对本书部分章节感兴趣的读者阅读。

在本书即将出版之际，作者要向其硕士生导师陈尧隆教授和李守义教授、博士生导师仵彦卿教授、博士后合作导师刘浩吾教授致以崇高的谢意，是他们将作者引入到大坝工程渗流力学的研究领域，他们的言传身教和学术著作对作者的学术思想形成产生了巨大的影响。

作者特别感谢工人日报社记者王景远同志、西藏人民出版社编辑洛桑次仁同志等人为本书出版付出的辛勤工作。作者还要感谢以下老师和同学各方面的指导和帮助：谢定义教授、李宁教授、郭增玉教授、袁继国博士、崔中兴博士、丁卫华博士、杜效鹄博士、柴贺军博士、邹用民老师、等等。最后特别感谢作者的家人这些年来对作者的理解与支持。

由于大坝工程渗流力学研究的复杂性，加之作者的学术水平和工作经验有限，书中不妥之处或缺点在所难免，敬请专家学者及广大读者批评指正。

柴军瑞

2001年4月于四川大学

目 录

1 渗流力学基础

1.1 渗流与渗流力学	1
1.2 渗流力学的研究内容和研究方法	2
1.3 渗流力学的流体力学基础	5
1.4 渗流力学的基本理论	6
参考文献	11

2 大坝工程渗流力学概述

2.1 坝工建设概述	13
2.2 渗流力学研究在大坝工程中的重要性	14
2.3 大坝工程渗流力学的基本概念	16
2.4 大坝工程渗流力学发展概述	18
参考文献	31

3 坝基裂隙岩体渗流分析

3.1 采用 Monte-Carlo 模拟技术计算裂隙岩体的 分维数与渗透系数张量	42
3.2 裂隙岩体渗透特性分类的多指标体系模糊数学 方法	49
3.3 单裂隙非稳定流分析	56
3.4 变隙宽裂隙渗流分析	63
3.5 岩体裂隙网络渗流自由面的确定方法	71

3.6 岩体三维主干裂隙网络渗流分析	75
3.7 岩体多重裂隙裂隙网络渗流分析	84
参考文献	93

4 大坝渗流分析与控制

4.1 坝基面渗透静水压力分布	96
4.2 坝基最优帷幕灌浆区厚度	107
4.3 排水孔在裂隙岩体坝基中的排水降压作用	119
4.4 碾压混凝土坝层(缝)面渗流分析	122
4.5 碾压混凝土坝防渗排水设施优化设计	128
4.6 采用边界元法确定渗流自由面的一种 改进方法	135
参考文献	140

5 渗流与应力、渗流与温度的相互作用

5.1 单裂隙水流对裂隙壁施加的拖曳力分析	143
5.2 岩体渗流与应力相互作用关系评述与小结	150
5.3 岩体裂隙网络渗透力对应力的影响	157
5.4 碾压混凝土坝层(缝)面渗流对坝体应力的 影响	170
5.5 大坝水荷载讨论	172
5.6 渗流对岩土体抗剪强度的影响	180
5.7 渗流与温度的相互作用	189
参考文献	193

6 渗流场与应力场耦合分析

6.1 均质土坝渗流场与应力场耦合分析	198
6.2 碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析	206
6.3 裂隙网络岩体三维渗流场与应力场 耦合分析	208
6.4 岩体渗流场与应力场耦合分析的多重裂隙网络 模型	209
6.5 计算软件开发	219
参考文献	222

7 渗流场与温度场耦合分析

7.1 混凝土坝渗流场与温度场耦合分析	224
7.2 岩体渗流场与温度场耦合的连续介质模型	228
7.3 一维渗流场与温度场耦合模型的解析演算	229
7.4 耦合水流重力势、温度势及应力影响的一维 渗流分析	237
参考文献	245

8 工程应用实例

8.1 某水电站坝区渗流场与应力场耦合分析	247
8.2 某碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析	261
8.3 某碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析	271
8.4 某碾压混凝土坝渗流场与温度场耦合分析	279
参考文献	286

作者简介	287
------------	-----

Seepage Theory for Dam Engineering

Contents

1 Fundamentals of Seepage Theory

1.1 Seepage and Seepage Theory	1
1.2 Research Contents and Methods for Seepage Theory	2
1.3 Basic Fluid mechanics Laws used in Seepage Theory	5
1.4 Basic Laws in Seepage Theory	6
References	11

2 Introduction to Seepage Theory for Dam Engineering

2.1 Introduction to Dam Engineering	13
2.2 Importance of Seepage Research in Dam Engineering ...	14
2.3 Basic Concepts of Seepage Theory for Dam Engineering	16
2.4 Development of Seepage Theory for Dam Engineering...	18
References	31

3 Seepage through Fractured Rock Mass in Dam Foundation

3.1 Determining the Fractal Dimension and Hydraulic Conductivity Tensor of Fractured Rock Mass by Monte-Carlo Analogy Technique	42
3.2 Classification of Fractured Rock Mass Permeability by Fuzzy Set	49

3.3 Unsteady Flow through Single Fissure	56
3.4 Flow through Fractures of Variable Apertures	63
3.5 Seepage Free Surface in Fracture Network of Rock Mass	71
3.6 Seepage through the 3-D Main Fracture Network in Rock Mass	75
3.7 Multi-Level Fracture Network Model for Seepage in Rock Mass	84
References	93

4 Seepage through the Dam and Seepage Control Measures

4.1 Hydrostatic Seepage Pressure on Dam Foundation Plane	96
4.2 Optimal Thickness of Curtain Grouting in Dam Foundation	107
4.3 Effect of Drain Hole in Dam Foundation of Fractured Rock Mass	119
4.4 Seepage through Layers in Roller Compacted Concrete Dam	122
4.5 Optimization of Seepage Control and Drain Measures in RCCD	128
4.6 A Modified BEM Method for Determining Seepage Free Surface	135
References	140

5 Interaction between Seepage and Stress, Seepage and Temperature

- 5.1 Hauling Forces Applied on Single Fissure Walls
by Fluid Flow 143
- 5.2 Summary of Interaction between Seepage and
Stress in Rock Mass 150
- 5.3 Effect of Seepage Forces in Fracture Network on
Stress of Rock Mass 157
- 5.4 Effect of Seepage through Layers on Stress of RCCD ... 170
- 5.5 On Water Load Applied on the Dam 172
- 5.6 Effect of Seepage on Shearing Strength of Rock
and Soil Mass 180
- 5.7 Interaction between Seepage and Temperature 189
- References 193

6 Coupled Seepage and Stress Fields

- 6.1 Coupled Seepage and Stress Fields in Single-Zone
Embankment Dam 198
- 6.2 Coupled Seepage and Stress Fields in RCCD 206
- 6.3 Coupled Seepage and Stress Fields in 3-D Fracture
Network 208
- 6.4 Multi-Level Fracture Network Model for Coupled
Seepage and Stress Fields 209
- 6.5 Development of Soft ware Kit 219
- References 222

7 Coupled Seepage and Temperature Fields

7.1 Coupled Seepage and Temperature Fields in Concrete Dam	224
7.2 Continuum Model for Coupled Seepage and Temperature Fields in Rock Mass	228
7.3 Theoretical Solution for 1-D Coupled Seepage and Temperature Fields	229
7.4 Hydraulic Head in Combined Gravity- Compression-Temperature Driven Flow	237
References	245

8 Examples of Engineering Application

8.1 Coupled Seepage and Stress Fields in a Dam Area	247
8.2 Seepage Body Forces in a RCCD	261
8.3 Coupled Seepage and Stress Fields in a RCCD	271
8.4 Coupled Seepage and Temperature Fields in a RCCD ...	279
References	286

Introduction to the author	287
---	------------

1 渗流力学基础

1.1 渗流与渗流力学

渗流是指含空隙（孔隙、裂隙等）介质中流体（液体、气体）通过空隙的流动^[1]。渗流现象在自然界中是广泛存在的。地下水的流动是最典型的渗流现象，它与人类的各种活动密切相关。另外，其他流体（如石油、天然气、煤矿瓦斯等）在地下的流动都属于渗流现象。

渗流可以依据不同的分类标准进行分类。按渗透流体的相状态，可将渗流分为液体渗流、气体渗流及多相体渗流。按渗流状态是否随时间发生变化，可将渗流分为稳定渗流与非稳定渗流。按某相渗透流体在介质空隙中是否饱和，可将渗流分为饱和渗流与非饱和渗流。按渗透流体的流态，可将渗流分为层流渗流与紊流渗流。按渗透流体是否处于有压状态，可将渗流分为有压渗流与无压渗流。还有一些其它分类方法。

渗流力学是研究含空隙介质中流体的运动规律及其效应的学科。这里的效应指的是渗流的力学效应、物理效应及化学效应等。很明显，从理论基础上来讲，渗流力学是流体力学的一个分支学科。同时，渗流力学又是一门实用性很强的应用学科，广泛地应用于水利水电工程、岩土工程、土木建筑工程、水资源开发与利用、环境工程、水文地质、工程地

质、石油开发、煤炭天然气开发、地热开发、地震预报与控制、地下工程以及核废料处置等领域。所以，从应用的角度来讲，渗流力学是一门多学科交叉的边缘学科^[2]。

渗流力学的发展已有一百多年的历史。早在 1856 年，法国工程师达西（H. Darcy）通过均质砂土中液体渗流实验的研究总结出来了渗流的最基本、最重要的公式—达西定律（线性渗透定律），为渗流力学的发展奠定了基础。虽然达西的实验研究是在均质砂土中液体作均匀流的情况下进行的，但是他的研究成果已被后来的学者推广到了整个渗流力学中，至今仍为沿用。1889 年，前苏联学者 H. E. 茹可夫斯基首先推导出了渗流的微分方程。此后，许多科学家、学者对渗流力学模型进行了广泛和深入的研究，并取得了一系列的研究成果。1922 年，前苏联学者 H. H. 巴甫洛夫斯基提出了求解渗流场的电拟法，为解决比较复杂的渗流问题提供了一个有效的工具。经过不断发展和完善，电拟法已发展为基于变分原理的电网络法^[2]。二十世纪六十年代，随着电子计算机的迅速发展，数值方法（即有限差分法、有限单元法和边界元法）在渗流分析中得到了愈来愈广泛的应用。特别是有限单元法提出后，推进了渗流数学模型的发展，为渗流分析提供了有效的方法。

1.2 渗流力学的研究内容和研究方法

渗流力学的研究对象是渗透流体及其通过的介质。渗透流体包括液体、气体及多相体（如液—气两相流、液—固两

相流等)。介质包括土体、岩体及某些人工材料(如混凝土等)^[1]。

根据渗流力学的研究对象,渗流力学的研究内容可以概括为以下几个方面:

(1) 渗流力学基本概念研究。包括介质(主要是岩土体)系统的概念及组成,介质系统的空隙性、渗透性等基本概念,以及渗透流体的特性等。

(2) 渗透流体的运动规律研究。包括渗流规律的地质分析研究、不同介质各种情况下渗透流体运动的基本规律研究等。

(3) 渗流的力学效应、物理效应以及化学效应研究。包括渗透稳定性问题研究、渗流的传热传质(溶质)研究以及渗透流体和介质的化学作用研究等。

(4) 渗流力学的数学模型研究。包括渗流数学模型、溶质运移数学模型、耦合数学模型(如渗流与溶质运移耦合模型、渗流场与应力场耦合模型、渗流场与温度场耦合模型以及多场耦合模型)的建模方法研究,这些数学模型及其计算方法研究。

(5) 渗流力学参数研究。包括渗流力学参数的地质统计学方法研究,压(抽)水试验方法研究,数学模型反演方法研究以及各种耦合关系参数研究。

(6) 渗流力学应用研究。包括渗流力学在水利水电工程、岩土工程、土木建筑工程、水资源开发与利用、环境工程、水文地质、工程地质、石油开发、煤炭天然气开发、地热开发、地震预报与控制、地下工程以及核废料处置等领域的应用研究。

可以看出, 渗流力学的研究内容非常广泛, 特别是应用研究所涉及的领域很多。作为一门理论性与实用性都很强的学科, 渗流力学的研究方法有以下几种^[4]:

(1) 渗流力学的地质分析方法。由于渗透流体及介质(主要是岩土体)系统均处于一定的地质环境内。对地质环境研究的一个重要的方法就是地质分析方法。通过地质分析, 定性了解介质系统的空隙空间及流体赋存条件、地质条件等。

(2) 室内与野外试验方法。室内试验包括试样的渗流力学参数试验和整体渗流模型试验(一般采用电网络法)两大类, 野外试验包括确定渗流力学参数的抽(压)水试验及原位试验。随着测试新技术的应用, 渗流力学试验方法也将得到很大的发展。

(3) 数学模拟方法。由渗透流体的运动规律出发, 建立渗流力学的数学模型(控制方程一般为偏微分方程或偏微分方程组), 并讨论各种定解条件(初始条件和边界条件)下数学模型的解。由于问题的复杂性, 渗流力学的数学模型仅在简单理想的定解条件下有解析解。对实际应用来讲, 一般要采用近似的数值求解方法(如有限差分法、有限单元法、边界元法及耦合数值求解方法等)。

(4) 系统分析方法。由于问题的复杂性, 渗流力学研究目前仍存在不少“灰色地带”。系统分析方法将渗透流体及介质看成一个“灰色”系统, 分析系统在输入作用下的输出响应, 经数据处理和数学计算, 估计出系统的数学模型。

1.3 渗流力学的流体力学基础

渗流是一种特殊的流体，其运动规律应满足流体力学的基本原理。以下是渗流力学中常用的流体力学基本原理^[5]。

(1) 连续性方程（即质量守恒）

微分形式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1.3-1)$$

积分形式：

$$-\oint_V \rho \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dA = \iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV \quad (1.3-2)$$

以上两式中， ρ 为流体的密度， $\mathbf{v}$ 为流体的速度矢量， A 为封闭区域（控制体）的表面面积， V 为其体积， $\mathbf{n}$ 为微元面积矢量 dA 外法线方向的单位矢量， t 为时间坐标。对不可压缩流体，以上两式中 $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ ，且 ρ 不随空间位置发生变化。

(2) 运动方程：

$$\mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p = \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (1.3-3)$$

式中， $\mathbf{f}$ 为单位质量力矢量， p 为流体的压力。

(3) 动量方程：