

Non-linear Seepage Problem for Dam Engineering

# 大坝工程渗流非线性问题

柴军瑞 徐维生 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

陕西省重点学科建设专项资金资助

**Non-linear Seepage Problem for Dam Engineering**

# **大坝工程渗流非线性问题**

柴军瑞 徐维生 著



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 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。第1章简要介绍大坝工程渗流力学概述和大坝工程渗流非线性问题类型。第2章讨论了裂隙岩体渗流分析。第3~5章分别论述了渗流区域非线性问题、渗流本构关系非线性问题和裂隙岩体非饱和渗流。第6~8章讨论了渗流场与应力场耦合分析、渗流场与温度场耦合分析和岩体离散裂隙网络渗流—溶质运移数值模拟,第6~8章内容分别论述了3种不同类型的渗流耦合非线性问题。第9章则讨论了遗传算法在大坝渗流分析中的应用。第10章则是相关理论的工程应用实例。

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。

## 图书在版编目(CIP)数据

大坝工程渗流非线性问题 / 柴军瑞, 徐维生著. --  
北京: 中国水利水电出版社, 2010.11  
ISBN 978-7-5084-8085-5

I. ①大… II. ①柴… ②徐… III. ①大坝—水利工程—渗流—非线性—研究 IV. ①TV698.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第225217号

|      |                                                                                                                                |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名  | 大坝工程渗流非线性问题<br>Non-linear Seepage Problem for Dam Engineering                                                                  |
| 作 者  | 柴军瑞 徐维生 著                                                                                                                      |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>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  | 北京市兴怀印刷厂                                                                                                                       |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 10.5印张 249千字                                                                                                  |
| 版 次  | 2010年11月第1版 2010年11月第1次印刷                                                                                                      |
| 印 数  | 0001~2000册                                                                                                                     |
| 定 价  | 25.00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

# 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1/3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。大坝渗流力学就是在此基础上发展起来的。

在渗流力学研究中,为了便于进行数学处理和实际应用,通常采用线性的数学模型(如一般的渗流控制方程是以线性的达西定律推导出来的线性的偏微分方程)。应该说,线性数学模型往往是对渗流运动状态的某种程度的近似和简化,且大大地促进了渗流力学的发展。但由于受各种因素的综合影响,渗流运动的实际表现呈非线性,因而非线性问题也是渗流力学研究的主要内容之一。笔者将大坝渗流力学中通常出现的非线性问题按非线性性质划分为以下7类:①渗流区域非线性问题(具有自由面的无压渗流);②本构关系非线性问题(非达西渗流);③渗透参数非线性问题(非饱和渗流);④流态非线性问题(多相体渗流);⑤介质非线性问题(多重介质渗流);⑥相互作用非线性问题(渗流与溶质运移、温度、应力等耦合问题);⑦多重非线性问题(上述两种或两种以上非线性问题的组合)。上述渗流非线性问题在大坝工程中普遍存在,因此,对其进行研究具有理论和实际意义。

从1993年起,笔者及笔者的老师和学生先后连续地进行了与大坝工程渗

流力学有关的研究工作,本书就是笔者及其老师和学生这些年来研究工作的系统总结。全书分为10章。第1章简要介绍大坝工程渗流力学概述和大坝工程渗流非线性问题类型。第2章讨论了裂隙岩体渗流分析。第3~5章分别论述了渗流区域非线性问题、渗流本构关系非线性问题和裂隙岩体非饱和渗流。第6~8章讨论了渗流场与应力场耦合分析、渗流场与温度场耦合分析和岩体离散裂隙网络渗流—溶质运移数值模拟,第6~8章内容论述了3种不同类型的渗流耦合非线性问题。第9章则讨论了遗传算法在大坝渗流分析中的应用。第10章则是相关理论的工程应用实例。各章节相互联系,又具有一定的相对独立性,因此也适合于对本书部分章节感兴趣的读者阅读。

笔者对在大坝渗流力学领域作出贡献的学者和相关工程技术人员表示衷心感谢,对一直关心和指导我们研究的老师、同事和同行表示衷心的感谢,对我们所有的老师和学生(他们包括:李康宏、何萌、邓祥辉、陈兴周、何杨、崔文娟、许增光、程汉鼎、王科锋、伍美华、徐文林、方涛、白勇、宁博、王国辉、戚建帮、张忠云、卢西霞、刘钊、杨雯惠、王玉才、马超、孙旭曙、刘钊、杜成伟)在这一领域的研究贡献表示感谢,对为本书顺利出版提供过各种帮助的人表示衷心感谢。

本书得到了陕西省重点学科建设专项资金资助,在此表示衷心的感谢。同时也得到了笔者主持的国家自然科学基金项目:裂隙岩体水—岩—热耦合非线性动力学模型研究(10202015),水—岩耦合作用下高边坡变形机理与稳定性分析(50579092),教育部新世纪优秀人才支持计划项目:高坝工程非线性渗流力学的系统研究(NCET—05—0679),湖北省“楚天学者”项目:高坝工程渗流应力耦合理论研究(0620060038),湖北省青年杰出人才基金:高坝工程渗流力学非线性问题(2004ABB012),教育部博士点基金:离散裂隙网络水—岩—热—溶质运移耦合数值分析(20096118110007);三峡大学创新团队基金:高坝工程固—液耦合非线性仿真分析(200402);西安理工大学优秀博士学位论文基金项目:考虑多场广义耦合作用下的高坝工程渗流非线性问题(106—210913)等项目的资助,在此一并表示衷心的感谢。

应该指出,大坝工程渗流力学是一门发展中的交叉学科,尚有很多理论和实际应用问题需要做进一步的研究和完善。由于各种原因,书中不妥之处或缺点在所难免,笔者愿与读者共同探讨,恳切希望批评指正。

柴军瑞 徐维生

2010年7月

前言

第 1 章 大坝工程渗流力学概述..... 1

1.1 研究意义 ..... 1

1.2 研究概述 ..... 2

1.3 研究内容和研究方法 ..... 8

1.4 大坝工程渗流非线性问题 ..... 10

参考文献..... 10

第 2 章 裂隙岩体渗流分析 ..... 16

2.1 岩体裂隙网络二维非稳定渗流分析 ..... 16

2.2 岩体三维裂隙网络非稳定渗流分析 ..... 22

2.3 岩体多重裂隙裂隙网络渗流分析 ..... 24

参考文献..... 28

第 3 章 渗流区域非线性问题 ..... 29

3.1 单元渗透矩阵调整法求解渗流自由面 ..... 29

3.2 二维稳定渗流分析的复合单元高斯点法 ..... 29

3.3 三维稳定渗流分析的复合单元高斯点法 ..... 33

3.4 复合单元高斯点法解的稳定性的讨论 ..... 37

3.5 传导矩阵调整法确定岩体裂隙网络渗流自由面 ..... 38

参考文献..... 41

第 4 章 渗流本构关系非线性问题 ..... 42

4.1 岩体裂隙网络非稳定非线性非立方渗流研究与应用 ..... 42

4.2 岩体裂隙网络渗流区域本构双重非线性问题..... 45

参考文献..... 49

第 5 章 裂隙岩体非饱和渗流 ..... 51

5.1 绪论 ..... 51

5.2 裂隙岩体非饱和渗流的基本概念 ..... 54

5.3 裂隙岩体非饱和渗流数值模拟的本构关系 ..... 60

5.4 裂隙岩体非饱和渗流数值模拟理论 ..... 66

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 5.5 结论与展望                      | 71         |
| 参考文献                           | 72         |
| <b>第6章 渗流场与应力场耦合分析</b>         | <b>74</b>  |
| 6.1 单裂隙水流对裂隙壁施加的拖曳力分析          | 74         |
| 6.2 岩体渗流与应力相互作用关系评述与小结         | 77         |
| 6.3 岩体裂隙网络渗透力对应力的影响            | 79         |
| 6.4 均质土坝渗流场与应力场耦合分析            | 82         |
| 6.5 碾压混凝土坝渗流场与应力场耦合分析          | 85         |
| 6.6 岩体裂隙网络二维渗流场与应力场的耦合分析       | 86         |
| 6.7 岩体裂隙网络三维渗流场与应力场的耦合分析       | 89         |
| 6.8 岩体渗流场与应力场耦合分析的多重裂隙网络模型     | 92         |
| 参考文献                           | 93         |
| <b>第7章 渗流场与温度场耦合分析</b>         | <b>96</b>  |
| 7.1 渗流与温度的相互作用                 | 96         |
| 7.2 混凝土坝渗流场与温度场耦合分析            | 98         |
| 7.3 一维渗流场与温度场耦合模型的解析演算         | 100        |
| 7.4 考虑裂隙水流影响的岩体裂隙网络非稳定温度场数值分析  | 102        |
| 7.5 三维岩体裂隙网络渗流温度耦合数值分析         | 104        |
| 参考文献                           | 111        |
| <b>第8章 岩体离散裂隙网络渗流—溶质运移数值模拟</b> | <b>113</b> |
| 8.1 引言                         | 113        |
| 8.2 溶质运移的基本理论                  | 113        |
| 8.3 地球化学模拟的基本理论                | 122        |
| 8.4 工程应用                       | 126        |
| 8.5 本章小结                       | 129        |
| 参考文献                           | 129        |
| <b>第9章 遗传算法在大坝渗流分析中的应用</b>     | <b>131</b> |
| 9.1 基于遗传算法和有限元法的渗流参数反演         | 131        |
| 9.2 基于遗传算法和复合形法确定坝基帷幕灌浆优化方案    | 134        |
| 9.3 基于渗流应力耦合理论的防渗设施优化研究        | 136        |
| 参考文献                           | 138        |
| <b>第10章 工程应用实例</b>             | <b>139</b> |
| 10.1 大柳树水利枢纽坝区渗流场与应力场耦合分析      | 139        |
| 10.2 龙滩碾压混凝土高坝防渗排水设施设计及耦合分析    | 154        |
| 参考文献                           | 159        |

# 第 1 章 大坝工程渗流力学概述

## 1.1 研究意义

大坝是挡水建筑物，其渗透性是大坝设计、施工及运行的最主要问题之一。一方面，若大坝存在严重的坝基和坝肩渗漏，水库不能蓄到预定水位的话，则该大坝工程是失败的。另一方面，由于渗透引起的大坝的稳定及安全问题就更为重要了。根据对国内外大坝失事实例的分析可知，有很大一部分大坝的失事都是由于坝基和坝肩中的渗流引起的<sup>[1]</sup>。例如法国 Malpasset 拱坝其坝高 66.5m，1959 年溃坝，死亡约 500 人，经济损失约 300 亿法郎，为坝工界重大惨案之一。关于该坝的失事原因与破坏机理，有多种理论，而且至今仍为坝工界所争论<sup>[2]</sup>。但是和大坝破坏痕迹相符且为大多数专家学者所公认的破坏机理如下<sup>[3]</sup>：左岸坝踵开裂→渗流进入坝基→滑动楔形体受向下游的压力作用→断层区渗透系数降低为原来的 1%（阻水）→滑动楔形体受很高的静水扬压力→滑动楔形体局部失稳→左岸重力墩向下滑移→大坝沿右岸扭转弯曲→溃坝。此坝的破坏机理从一个方面说明了进行坝区动态的渗流场与应力场耦合研究的重要性。又如意大利 Vajont 拱坝其坝高 265m，水库设计正常高水位 722.5m。1963 年 9 月，当库水位到 700m 高程时，左岸上游距大坝 1.8km 处发生了约 2.7 亿 m<sup>3</sup> 的 M 形大型滑坡，将上游水库完全填满还高出水面 150m，造成坝前高 125m 的涌浪翻越坝顶，横扫下游河谷内的一切建筑物，死亡约 2000 人，造成了巨大的生命和财产损失，为坝工界又一重大惨案。所幸，大坝安然无恙，仅左岸坝顶混凝土略有损坏。事后分析得出的此库岸大滑坡的破坏机理为<sup>[4]</sup>：左岸倾向河床的岩层层面与卸荷裂隙、断层及古滑坡面组成一个大范围的不稳定岩体，层面上的黏土夹层、软弱岩层起主要作用；蓄水后由于岩溶发育，与断层、裂隙相连形成地下水补给集中区，使滑坡体扬压力和下滑力增大，而抗滑力减小；水位升高至 710m 后又骤降至 700m，内水外渗，形成向水库的渗透力；连续降雨十几天，滑坡体完全饱和，从而触发大滑坡。此库岸大滑坡的破坏机理说明库水和降雨的入渗及其作用是产生滑坡的主要诱发因素。

从上述溃坝和大滑坡的工程实例可以看出，由于水库蓄水（大幅度抬高上游水位，上下游形成巨大的水头差）所引起的一系列问题应是大坝工程研究的主要问题。其中，工程安全和环境生态影响这两大问题都与渗流力学有关。进行渗流力学研究，可以搞清水库蓄水后坝区库区地下水动态的变化，以及由此而对工程安全和环境生态所造成的直接和间接影响，从而为提高大坝工程设计水平提供强有力的技术支持。因此，进行渗流力学研究在大坝工程中具有很重要的理论与现实意义；而渗流力学理论的发展和完善，也得益于大坝工程建设等行业的不断实践，两者之间是相辅相成的。

## 1.2 研究概述

### 1.2.1 大坝坝体渗流研究综述

随着坝工建设的发展,大坝渗流分析与研究技术日趋完善<sup>[5]</sup>。其中土石坝渗流分析与研究的历史最为悠久,其技术也最为成熟,这主要是由于土石坝这种坝型的特点所决定的。用当地材料(土石料)所修建的土石坝体积庞大,一般不会因为整体滑动而失稳,其破坏模式一般为局部的滑坡。由于土石坝中的渗流一方面降低了土石料的抗剪强度指标( $\varphi, c$ ),另一方面又给土石料施加了渗透力(目前用有效应力的降低来考虑渗透力的影响<sup>[6]</sup>),因此土石坝的渗流分析在土石坝的强度与稳定性分析方面占有举足轻重的地位。目前土石坝设计规范中规定采用水力学方法进行土石坝渗流分析,但对大型工程也需进行土石坝渗流的模型试验与有限元分析<sup>[7]</sup>。目前已进行了土石坝的非饱和、非稳定渗流研究<sup>[8,9]</sup>。

土石坝的渗透特性因筑坝材料的不同而有很大的不同。均质土坝本身既是挡水体,又是防渗体,因此整个坝体区域的渗透系数都应当较小;通过均质土坝的渗流一般为层流且满足达西定律。对采用黏土心墙或黏土斜墙防渗的土石坝来说,通过黏土心(斜)墙的渗流一般为层流且满足达西定律,但存在起始水力坡度(即对黏土而言,很小的水力坡度并不会发生渗流)<sup>[10]</sup>;通过堆石体(包括砂砾石坝料)的渗流一般为紊流,不满足达西定律<sup>[11-13]</sup>。对采用(沥青)混凝土面板防渗的土石坝(包括定向爆破堆石坝)来说,通过防渗面板的渗流一般为层流,且满足达西定律;但通过堆石体的渗流一般为紊流,也不满足达西定律<sup>[14]</sup>。

混凝土重力坝是依靠其自身重量来维持稳定的,因此混凝土重力坝的渗流分析与控制以降低坝体和坝基的渗透压力为主要目的。一般在混凝土重力坝的坝体及坝基内设置排水孔列和排水廊道来降低渗透压力,并降低坝体内浸润线的位置<sup>[15]</sup>。关于排水孔列的数值模拟,由于排水孔甚小,为了计算方便,一般均把排水孔当做给定水头的一条线,而忽略孔径大小的影响,即将排水孔都布置在单元的边及节点上。这种作法会带来不可忽视的误差。正确的作法是将排水孔壁作为边界处理,但它使单元网格剖分过分复杂,有时会因此使计算规模大到难以接受的程度。考虑到边界单元法在处理复杂边界时的优势,可综合应用有限元法和边界元法来模拟排水孔列。基于上述思路,张有天<sup>[16]</sup>、朱岳明<sup>[17]</sup>分别提出了模拟排水孔列的排水单元法,即:若在某排水单元内有 $n$ 个排水孔,就将该单元分成 $n$ 个子结构,每个子结构内有一个排水孔;在每个子结构内,采用边界元法计算排水孔的影响;再由子结构向排水单元凝聚,求出反映排水孔列效应的排水单元传导矩阵;然后与其他单元组装成总体传导矩阵求解渗流场。

混凝土拱坝属于高次超静定的壳体结构,体积小,整体性好。因此,混凝土拱坝的坝体渗流量一般较小,渗流分析与控制以减少坝基渗流、绕岸渗流及提高坝体和坝基连接的整体性为主要目的<sup>[18,19]</sup>。帷幕灌浆是减少坝基渗流、绕岸渗流最有效的工程措施,经帷幕灌浆处理的岩体区域的渗透性明显减弱。但是,由于帷幕灌浆的效果并非处处均匀,因此在渗流分析中如何对帷幕灌浆区域进行定量化处理仍是需要进行研究的问题。

碾压混凝土筑坝技术因其快速高效的优点在近 20 多年来得到了快速的发展<sup>[20,21]</sup>。碾

压混凝土由于是大面积薄层浇筑,水平施工缝多,所以必然带来层面结合问题。如果碾压混凝土层面结合不好,出现的首要问题将是坝体渗漏。这一点已为世界上第一座全碾压混凝土坝——柳溪(Willow Creek)坝的渗漏情况所证实<sup>[20]</sup>。在柳溪坝钻孔内进行压水试验求得的包括层面渗透性在内的沿层面水平方向的综合渗透系数为碾压混凝土体渗透系数的 $10^5 \sim 10^6$ 倍,这明显是由于碾压混凝土层面的渗透性造成的。另外,沿层面水平方向的综合渗透系数与测试部位有明显关系,深部碾压混凝土综合渗透系数明显减小,这主要是因为深部碾压混凝土层面受有较大的上部自重荷载,使层面缝隙产生闭合变形而使其渗透性减弱。所以,应力环境也是影响碾压混凝土层面渗透性的主要因素。鉴于碾压混凝土坝层面的渗透性,目前坝工界普遍认为应在碾压混凝土坝的上游面单独设置专门的防渗结构来控制坝体渗流;并在上游防渗结构后设置排水孔和排水廊道,用来进一步削减渗透水头,降低浸润线位置。上述碾压混凝土坝的特点使碾压混凝土坝渗流分析与普通混凝土坝渗流分析有所不同,特别是碾压混凝土层面的渗透性。由于层(缝)面的存在,目前碾压混凝土坝坝体的渗流分析可归结为两大类方法<sup>[21]</sup>:第一种方法是等效连续方法,即以渗流量等效原理为基础,将层(缝)面的渗透特性反映在坝体的综合渗透系数之中,这样坝体平行于层(缝)面方向的渗透系数远远大于垂直于层(缝)面方向的渗透系数;第二种方法是单独考虑层(缝)面的渗透性,采用各种模型模拟层(缝)面渗流,其中以裂隙流(满足立方定律)模型<sup>[22]</sup>和界面元模型<sup>[23]</sup>为代表。

坝体渗流分析中需要确定渗流自由面(二维渗流分析时为浸润线,三维渗流分析时为浸润面)的位置。由于部分渗流域边界(渗流自由面)是未知的,使得这类问题变为非线性问题。求解此类问题的有限元法以往采用移动网格法。此法直接引用20世纪60年代中期 Zienkiewicz 等人最初求解简单有压渗流问题时的方法,在遇到渗透性不同的水平成层地基及各种复杂夹层时,程序的数学处理不易;当初始自由面与最终自由面相差较大时,网格过分变形导致单元畸形。求解包含有自由面渗流区域的应力分布,求解范围包括自由面以上区域,该法不能用同一单元网格剖分来分析渗流场与应力场,增加了有自由面渗流域应力分析的工作量。相对而言,采用边界元法及迭代数值解法<sup>[24-26]</sup>确定渗流自由面优于有限元法的移动网格法,但也同样存在着层面及渗流应力耦合问题。为解决上述问题,国内外许多学者致力于寻找有自由面渗流分析的新方法,其研究核心就是计算中不变单元网格剖分。自 Neuman 于1973年提出用不变网格分析有自由面渗流的 Galerkin 法以来,出现了多种固定网格法,如剩余流量法、单元渗透矩阵调整法和初流量法<sup>[27]</sup>。以上述方法为基础,近年来又出现了许多固定网格法,如节点虚流量法<sup>[28]</sup>、虚单元法<sup>[29]</sup>、高斯点法<sup>[30]</sup>、子单元法<sup>[31]</sup>及改进的初流量法<sup>[32]</sup>,这些都使有自由面渗流分析的固定网格法得到了进一步的发展。

### 1.2.2 岩(土)体渗流研究综述

大多数情况下,可采用多孔连续介质渗流理论<sup>[10]</sup>进行土体渗流分析。但对于存在裂隙的土体(如黄土、裂隙黏土等)来说,其渗流分析方法应采用裂隙岩体渗流分析方法。

岩体的裂隙网络是裂隙岩体渗流与应力分析的物理基础。但是,由于实际岩体中裂隙网络的分布十分复杂,用人为调查方法无法全面描述岩体系统内裂隙的展布。从1950年开始,许多学者致力于裂隙网络的模拟技术研究,即先进行岩体露头的裂隙测量,再求裂

隙几何要素的概率密度分布函数,最后采用 Monte-Carlo 模拟技术模拟裂隙网络系统。

岩体裂隙野外调查经历了产状测量、测线法测量、窗口测量,从不考虑不连续面的形态,发展到要求不连续面的迹长、大小、具体位置测量的过程,其产生和发展基本上和岩体(水)力学的发展是同步的。陈剑平等(1995)<sup>[33]</sup>全面地总结了各国学者对不连续面几何性质研究的各方面成果<sup>[34-37]</sup>,从岩体结构统计均质区划分,不连续面产状数据模拟、产状测量偏校正,不连续面大小及密度模拟, Monte-Carlo 模拟及模型检验等几个方面系统地提出了随机不连续面三维网络的计算机原理,具有较强的可操作性。

关于分形理论在岩体裂隙网络分析中的应用<sup>[38]</sup>,主要有两个大的方面。一方面是指分形理论在描述裂隙面形状、凹凸不平粗糙度时的应用<sup>[39,40]</sup>,这一方面以谢和平(1996、1998)等<sup>[41-46]</sup>的研究成果为代表。另一方面是指分形理论在研究岩体裂隙分布规律时的应用,赵阳升(1994)<sup>[47]</sup>、申晋等(1998)<sup>[48]</sup>指出:小尺度岩体裂隙分布与大尺度岩体裂隙分布存在一种自相似关系。赵坚(1997、1998)<sup>[49-51]</sup>又提出了岩石节理吻合系数(JMC)的概念,并提出了岩石节理剪切强度的 JRC-JMC 新模型。这些研究成果有望应用于岩体裂隙网络分析中。

1985年,在美国亚利桑那大学召开了以裂隙岩体渗流为中心议题的第十七届国际水文地质大会。在这前后,国内外许多学者对裂隙渗流做了实验和理论探索。Barenblatt(1960)<sup>[52]</sup>、Streletsora(1975)、Iwai(1976)、Snow(1965, 1984, 1985)、Witherspoon and Neuzil(1981)<sup>[53]</sup>等学者把裂隙介质作为连续渗流介质,提出了有关裂隙渗流的立方定律和渗透系数张量的概念。Wilson 和 Witherspoon(1970)<sup>[54]</sup>、Maini(1972)把岩体当作连续和不连续介质分别进行计算比较后,提出最大裂隙间距或平均裂隙间距与最小边界尺寸之比分别大于 1/50 或 1/20 时应按不连续介质考虑。Barenblatt(1960)<sup>[52]</sup>最早提出了以裂隙介质导水、孔隙岩块介质储水为特征的双重介质模型,Warren 和 Root(1963)、Streletsora(1977)、Duguid(1977)、Huyakorn(1983)<sup>[55]</sup>、Neretnieks 等(1984)、Dykhuizen(1990)等学者也分别研究了双重介质模型。Wittke(1996、1986)等不考虑岩块的渗流,以真实裂隙网络展布为基础,运用线单元法建立了裂隙网络水流的线索模型,后发展为裂隙岩体渗流的裂隙网络模型。Lough 等(1998)<sup>[56]</sup>提出了用边界元法求解裂隙岩体渗流的方法,将裂隙看成埋置于孔隙岩块中的平面源(汇)流。Gavrilenko 等(1998)<sup>[57]</sup>提出考虑岩体微观到宏观裂隙渗流的改进重标准化法。Wei 等(1998)<sup>[58]</sup>提出研究裂隙岩体水力-化学特性的离散-连续介质耦合模型。Chao 等(1999)<sup>[59]</sup>进行了渗透性断层区域的实验研究。这些研究都推动了裂隙岩体渗流模型研究的进一步发展。

关于求解各向异性渗透系数张量的压水试验法是 Snow(1996)首先提出的,后经由 Rocha(1978)、Louis(1970, 1972)<sup>[60]</sup>和 Hsieh(1985)的研究,又分别有了校正系数法、三段压水试验法和交叉孔压水试验法。运用抽水试验法确定岩体渗透系数张量,是由 Papadapulos(1966)首次提出来的, Hantush(1966)、Way(1982)和 Neuman(1984)先后对确定各向异性渗透系数张量的抽水试验方法做了进一步的研究。Per 等(1999)<sup>[61]</sup>研究了岩石透气率与饱和渗透系数之间的关系。通过试验研究确定裂隙岩体的水力学参

数,是裂隙岩体渗流研究很重要的一方面内容。

20 世纪 80 年代末,随着大型水利工程的勘测修建,黄河水利委员会、长江流域规划办公室三峡勘察大队先后引进技术,在黄河小浪底水电工程和三峡水利工程做了现场三段压水试验,推求岩体裂隙渗透系数张量。田开铭 (1986)<sup>[62]</sup> 在实验室内进行了不等隙宽交叉裂隙的水力学试验,得出了交叉裂隙具有“偏流效应”的结论,后发展成偏流理论。田开铭、万力 (1989)<sup>[62]</sup> 对裂隙岩体流渗研究做了大量的工作。毛昶熙等 (1991)<sup>[63]</sup>、张有天等 (1997)<sup>[64]</sup> 和钱孝星 (1989、1990、1992) 等对裂隙水运动和求解方法提出了一些独特的方法。朱学愚、谢春红 (1990)<sup>[65]</sup> 提出了一种计算裂隙渗流的多孔介质模型和有限元解法,这种理论和方法的最大优点在于可以把局部坐标下的各向异性导水系数转化为全局坐标下的各向异性导水系数,从而简化了计算。王泳嘉等 (1991, 1999)<sup>[66,67]</sup> 提出了用离散单元法求解裂隙岩体渗流的基本思路。周志芳等 (1993~1997)<sup>[68-72]</sup> 应用有限分析法反演了裂隙岩体的渗透系数张量,并提出了裂隙渗流分析的混合网络有限元法,以反映各级裂隙对渗流的影响。万力等 (1993)<sup>[73]</sup> 提出了三维裂隙网络的多边形单元渗流模型。速宝玉等 (1994, 1997)<sup>[71,75]</sup> 对光滑型裂隙水流及交叉裂隙水流进行了模型实验,并得出结论:微裂隙渗流不满足立方定律,传统的裂隙网络渗流模型已自动考虑进了交叉裂隙水流的“偏流效应”。杨太华等 (1997)<sup>[76]</sup> 对岩体裂隙的非规则几何水力特性进行了研究。莫海鸿等 (1997)<sup>[77]</sup> 提出了裂隙介质网络水流的拓扑模型。王洪涛等 (1997, 1998)<sup>[78,79]</sup> 提出了三维随机裂隙网络非稳定渗流模型。陈尤雯等 (1997)<sup>[80]</sup> 进行了裂隙岩体中的对流扩散研究。肖裕行等 (1997, 1999)<sup>[81,82]</sup> 对裂隙岩体水力等效连续介质中的物理量进行了讨论。周创兵等 (1997, 1998)<sup>[83-85]</sup> 对岩石节理面形态与水力特性的关系进行了研究,还对岩石节理非饱和渗流特性、节理张开度概率模型与随机模拟进行了研究。王恩志等 (1998)<sup>[86]</sup>、成建梅等 (1998)<sup>[87]</sup>、艾瑶等 (1998)<sup>[88]</sup>、金曲生等 (1998)<sup>[89]</sup> 和沈洪俊等 (1998)<sup>[90]</sup> 也分别对裂隙岩体渗流模型进行了深入的研究。赵阳升等 (1999)<sup>[91]</sup> 进行了气液二相流体裂缝渗流规律的模拟实验研究。仵彦卿等 (1993, 1995, 1996, 1997, 1998)<sup>[4,92]</sup> 对国内外裂隙岩体渗流数学模型进行了系统地总结、归纳、发展和分类,指出裂隙岩体渗流数学模型分(等效)连续介质渗流模型、裂隙网络渗流模型以及(广义和狭义)双重介质渗流模型,并提出了岩体渗流的确定—随机性数学模型。

### 1.2.3 岩体渗流与应力耦合机理研究综述

单一裂隙(组)渗流与应力关系的建立,是裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析研究的基础和关键环节<sup>[93]</sup>。建立单一裂隙(组)渗流与应力耦合关系一般有以下 3 种方法:①直接通过试验总结出渗透特性与应力的经验公式;②根据裂隙面的法向、切向变形公式间接地导出渗透特性与应力的关系;③提出某种理论概念模型来解释渗流与应力的耦合规律。

在直接试验法方面,Louis (1974)<sup>[60]</sup> 首次建立了岩体渗透系数与正应力的经验关系式,指出渗透系数随正应力的增大而变小,两者之间呈负指数关系。Snow (1968) 通过试验得出平行裂隙在应力作用下渗透系数的表达式。Jones (1975)、Kranz (1979) 分别对碳酸盐类岩石、Barre 花岗岩进行了试验,得出渗透系数与正应力的关系。Gale (1982) 分别对花岗岩、大理石及玄武岩进行了试验。刘继山 (1987, 1988)<sup>[94,95]</sup> 用试验方法研究

了单裂隙和两正交裂隙受正应力时的渗流公式。仵彦卿等 (1994)<sup>[4]</sup> 通过实际岩样的室内试验得出了裂隙岩体渗透系数与岩体裂隙分维数之间的分形几何关系。速宝玉等 (1995, 1997)<sup>[96,97]</sup> 分别对贯通裂隙和充填砂浆裂隙进行了试验。张玉卓等 (1997, 1998)<sup>[98,99]</sup> 对裂隙岩体渗流与应力耦合进行了试验研究, 得出渗流量与应力成四次方关系或非整数幂关系的结论。郑少河等 (1999)<sup>[100]</sup> 进行了三维应力作用下天然裂隙岩体渗流规律的试验研究。以上通过试验得出的各种经验关系式都是在一定的实验条件下得到的, 还需要进行进一步的验证。

在间接公式法方面, Oda (1986)<sup>[101]</sup> 由裂隙几何张量来统一表达岩体渗流与变形之间的关系。Erichsen (1987)<sup>[102]</sup> 从岩体裂隙压缩或剪切变形分析出发, 建立了应力与渗流之间的耦合关系。Nolte (1989) 建立了用裂隙压缩量有关的指数公式描述裂隙渗流与应力之间的关系。Killsall 等 (1984)<sup>[103]</sup> 从岩体渗透的立方定律出发, 考虑 Goodman 单元的节理法向刚度模型, 导出了应力与裂隙隙宽、裂隙渗透系数之间的关系式。仵彦卿等 (1995)<sup>[4]</sup> 从理论上分析了剪应力作用下岩体中单裂隙渗流公式, 并导出了单裂隙中渗透压力与岩体变形量的定量关系式。周创兵等 (1996)<sup>[104]</sup> 提出了考虑岩体应力的裂隙渗流的广义立方定律。Bai 等 (1999)<sup>[105]</sup> 研究了非正交渗流情况下变形岩体渗透性随应力的变化规律。这些研究都推动了单一裂隙水力学模型的发展。

在概念模型方面, Gangi (1978)<sup>[106]</sup> 最早提出钉床模型, 将裂隙面看成具有一定概率密度分布形式的钉状物, 从钉状物受压力后的压缩量来讨论裂隙渗流与应力的关系。Walsh (1979, 1981) 又提出了洞穴模型, 从洞穴的变形来考虑裂隙渗流与应力的关系。Witherspoon 等 (1981)<sup>[107]</sup> 在总结以上两种模型的基础上又提出了洞穴—凸起模型, 综合考虑了洞穴与凸起物的变形。周创兵等 (1996)<sup>[104]</sup> 还提出了裂隙的半圆形凸起模型, 讨论了裂隙渗流与应力的耦合规律。Kim 等 (1999)<sup>[108]</sup> 从理论上分析了变形多孔介质渗透系数的表达式。这些理论模型都从理论上分析了裂隙渗流与应力的耦合机理, 尚需经过实践的检验。

#### 1.2.4 岩体渗流场与应力场耦合分析综述

鉴于问题的复杂性, 仵彦卿等 (1995)<sup>[4]</sup> 将岩体渗流场与应力场耦合分析数学模型的建模方法分为机理分析法、混合分析法及系统辨识法, 并分别形成岩体渗流场与应力场耦合分析的理论模型、经验—理论模型及集中参数模型这 3 种主要模型。由于对岩体介质不同的处理方法, 每种模型又可分为 (等效) 连续介质模型及非连续介质模型两种。以机理分析法建立起来的岩体渗流场与应力场耦合分析的理论模型就包括 (等效) 连续介质模型、裂隙网络模型及 (狭义与广义) 双重介质模型。

Noorishad (1982, 1984) 以 Biot 固结理论为基础, 把多孔弹性介质的本构方程, 推广到裂隙介质的非线性变形本构关系, 提出裂隙渗流与应力的耦合分析模型。Ohnishi 等 (1982, 1990)<sup>[109]</sup> 研究了非连续节理岩体的渗流与应力耦合方法, 提出了以节理元为基础的有限元模型, 并提出了地下工程围岩的应力—渗流—温度耦合的本构关系模型。Oda 等 (1993)<sup>[110]</sup> 以岩体节理统计为基础, 运用渗透率张量法, 建立了岩体渗流场与应力场耦合的等效连续介质模型。王媛等 (1998)<sup>[111,112]</sup> 提出了裂隙岩体渗流与应力耦合的“四自由度全耦合分析方法”, 其基本思路是: 将裂隙岩体渗流场和应力

场作为同一场进行,联立裂隙岩体满足的渗流方程和应力方程,建立起同时以节点位移和节点渗流水压力为未知量的耦合有限元方程组。黄涛等(1999)<sup>[113]</sup>进行了隧洞裂隙岩体温度—渗流耦合数学模型研究。赖远明等(1999)<sup>[114]</sup>进行了寒区隧洞温度场、渗流场和应力场耦合问题的非线性分析。朱珍德等(1999)<sup>[115]</sup>进行了裂隙岩体的渗流场与损伤场耦合分析模型及其工程应用研究。以上模型都属于(等效)连续法中的机理分析模型。由于实际工程岩体的不连续性,采用离散法进行裂隙岩体渗流场与应力场耦合分析具有广阔的发展前景。

关于裂隙岩体渗流场与应力场耦合模型在大坝工程中的应用方面,陶振宇(1991)用有限元法分析了对水库诱发地震有利断层组合,并对某水库诱发地震的震级进行了拟合分析。杨延毅等(1991)、段小宁(1992)、陈平和张有天(1994)等人都对重力坝坝基进行了裂隙岩体渗流应力二维耦合分析;耿克勤等(1997)<sup>[116]</sup>对龙羊峡水电站重力拱坝坝基和坝肩岩体进行了三维有限元耦合分析。顾冲时等(1999)<sup>[117]</sup>研究了渗流影响下坝体和坝基应力场。他们认为耦合作用对渗流场的影响远大于对应力场的影响,考虑耦合作用的影响,坝底扬压力将增加,不利于大坝等建筑物的稳定。张有天(1997)指出:进行岩基上水工建筑物设计时,应当进行耦合分析以确保工程安全。王媛等(1998)<sup>[111]</sup>对裂隙岩体边坡和重力坝岩基进行了渗流应力全耦合分析,认为若不考虑耦合作用的影响,则计算结果可能会夸大排水孔的作用。从以上的研究工作中也可以看出,对大坝坝基坝肩岩体进行裂隙渗流与应力耦合分析也是完全有必要的。

### 1.2.5 岩体渗流场与温度场耦合分析综述

自20世纪80年代以来,由于新能源新技术的发展,在裂隙介质传热领域内相继开辟了不少具有重要应用背景的新研究领域。

热量传递的载体来讲是多种多样的,裂隙介质及其中的流体就是一类。裂隙介质中的流体以液相或气相存在于裂隙空间中<sup>[118,119]</sup>。地下水中的热量运移主要是通过传导和对流来实现的,这种传输即使在静态的地下水中也可以发生,它受地层及其所保留的空隙水的热传导性控制。对流作用一般有两种,即强迫对流和自由对流。在大多数系统中,强迫对流传输热量远远超过了自由对流热量传输。由于温度不均而使流体的密度产生变化,致使流体产生对流而导致热量的传递,这种对流作用通常称为自由对流或自然热对流。在这种对流条件下,流体不能进入或离开系统。在天然地下水流系统的热量运移过程中,一般来说起主导作用的是强迫对流作用,因此,一般来讲地下水热量运移中的对流作用是指强迫对流,自由对流仅作为一个影响因素来考虑。

有的隧道由于渗流的影响,隧道围岩得不到及时冻结而出现隧道漏水、挂冰以及涎流冰等病害<sup>[120]</sup>。因此,为了解寒区隧道这些普遍存在的冻害问题,进行寒区隧道渗流场和温度场耦合问题的研究是非常必要的。就此问题国内外学者进行过一些研究。在国外,Banacina等<sup>[121]</sup>为了解决带相变的热传导问题提出了一种数值解法;Comini等<sup>[122]</sup>对相变热传导温度场非线性问题进行了有限元分析;在国内,赖远明等<sup>[123,124]</sup>既进行了寒区隧道渗流场和温度场耦合问题的非线性分析,又进行了寒区隧道渗流场、温度场和应力场耦合问题的非线性分析,但他们的研究只是针对二维平面问题;刘亚晨<sup>[125]</sup>试图从各自耦合过程特征出发,把裂隙岩体视为等效连续介质,对裂隙岩体介质THM耦合参数特性进行分

析,从而建立描述裂隙岩体介质 THM 耦合的数学模型;许增光<sup>[126]</sup>建立了岩体裂隙网络渗流场、水流温度场,岩块温度场耦合模型。然而采取裂隙网络模型来解决所遇到的岩土工程问题现在尚处于初步发展阶段,尤其是渗流场与温度场的耦合分析,现在还处于机理研究阶段<sup>[127]</sup>。

### 1.2.6 发展趋势

在理论研究方面,随着渗流力学与岩体水力学(或岩土体流体力学)基础理论的不断发展与完善(包括自然科学新基础理论的应用),渗流分析由饱和流向非饱和流、由稳定流向非稳定流、由达西流向非达西流、由单相流向多相流、由单场(渗流场)分析向多场(渗流场、应力场、温度场、溶质场)耦合分析发展;其总的趋势是更客观、更全面、更综合地反映流体在介质中存在与运动的规律。当然,随着研究的进一步深入,研究工作的难度将会越来越大。

在数值计算方面,随着计算机硬件技术的不断发展,使数千个单元的三维渗流分析能够在个人微型计算机上得以实现。因此,多场(渗流场、应力场、温度场、溶质场)耦合分析程序及软件的开发,不仅变得必要,而且使其普遍应用成为可能。以强化前、后处理功能为主要目的,数值计算的商业软件向大型化、应用简便化方向发展。

在测试技术方面,需要探讨经济实用的新型测试方法,包括新型测试设备的使用,如 CT 技术、激光技术、核磁共振(NMRI)技术、3S 技术(RS, GPS, GIS)等的应用仍需发展。此外,综合应用测试技术与计算技术的反演分析方法与数值试验技术也将得到进一步的发展。

在应用研究方面,渗流力学除继续为工程建设服务外,还将会大范围地应用于环境评价与保护研究。这一点已为目前发达国家的发展现状所证实。地下水污染、地下空间的合理开发、地下热能的净洁利用、核废料处置等问题的研究,都会促进渗流力学的进一步发展。

## 1.3 研究内容和研究方法

### 1.3.1 研究内容

大坝工程渗流力学是研究大坝及其周围地质体中渗透水流运动规律及其效应的学科,它是渗流力学在大坝工程研究、勘测、设计、施工及运行中的应用。大坝工程渗流力学的研究对象为大坝及其周围一定范围一定深度的地质体(岩土体)及其中的渗透水流,其主要目的是为大坝工程建设服务,解决大坝工程建设中的渗流力学问题。

根据大坝工程建设的需要,大坝工程渗流力学的研究内容主要包括以下几个方面<sup>[128]</sup>。

(1) 大坝及周围岩土体渗透特性研究。可以通过室内试验、野外现场(地质统计、抽水或压水)试验、反演分析等方法来确定大坝及周围岩土体渗透特性参数,如孔(空)隙率(比)、渗透率(张量)、渗透系数(张量)、孔(裂)隙分布的分维数等指标,为大坝及周围岩土体渗透特性分类及渗流分析与渗控设计提供依据。

(2) 大坝及周围地质体中渗流场分析与研究。要研究建坝以前坝区库区地下水渗流场

动态, 以及随着建坝蓄水的过程大坝及周围地质体中渗流场动态的变化, 可以采用水文地质调查与分析方法、理论分析方法、半理论分析方法 (如水力学法、流网法)、模型试验方法 (如电网络法)、数值分析方法 (如有限元法) 等方法进行。

(3) 大坝及周围地质体中渗流的力学效应研究。由于渗流对介质具有施力 (渗透静水压力和渗透动水压力) 和软化 (降低强度指标) 双重力学效应, 要研究水库蓄水而引起的坝基及库岸边坡渗透稳定性问题, 乃至水库诱发地震问题。由于渗流与应力、变形存在较强的相互作用关系, 此类问题可采用渗流场与应力场 (变形场) 耦合分析方法。

(4) 大坝及周围地质体中渗流的热学等其他物理化学效应研究。由于渗透水流具有传热传质 (溶质) 作用, 且渗透水流和介质可能发生化学反应, 要研究水库蓄水而引起的大坝内及坝区库区地下温度等环境生态因素的变化, 为大坝工程决策服务。

(5) 大坝工程施工建设中的渗流力学研究, 包括导截流施工引起的地下水渗流场变化研究、围堰渗流研究以及大坝基坑排水研究等。

可以看出, 作为一门应用基础学科, 大坝工程渗流力学的研究范围也特别广泛, 它需要综合利用渗流力学、水工结构、水文地质、工程地质、岩土力学、流体力学、固体力学、热力学、化学等学科的有关知识, 来解决大坝工程建设中的渗流力学问题, 为大坝工程决策、设计服务。

从学科地位来讲, 大坝工程渗流力学既是作为应用学科的水工结构的一个分支学科, 又是作为基础学科的渗流力学的一个分支学科, 它采用渗流力学的基本理论来解决大坝工程建设中的有关渗流力学问题, 同时又吸取大坝工程建设的实践经验来不断发展和完善其理论。

#### 1.3.2 研究方法

大坝渗流力学作为一门理论性与实用性都很强的学科, 研究方法有以下几种<sup>[4]</sup>。

(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。

## 1.4 大坝工程渗流非线性问题

在渗流力学研究中,为了便于进行数学处理和实际应用,通常采用线性的数学模型(如一般的渗流控制方程是以线性的达西定律推导出来的线性的偏微分方程)。应该说,线性数学模型往往是对渗流运动状态的某种程度的近似和简化,且大大地促进了渗流力学的发展。但由于受各种因素的综合影响,渗流运动的实际表现呈非线性;因而非线性问题也是渗流力学研究的主要内容之一。本书将大坝渗流力学中通常出现的非线性问题按非线性性质划分为以下7类<sup>[129]</sup>:①渗流区域非线性问题(具有自由面的无压渗流);②本构关系非线性问题(非达西渗流);③渗透参数非线性问题(非饱和渗流);④流态非线性问题(多相体渗流);⑤介质非线性问题(多重介质渗流);⑥相互作用非线性问题(渗流与溶质运移、温度、应力等耦合问题);⑦多重非线性问题(上述两种或两种以上非线性问题的组合)。

考虑到各种因素的影响,渗流运动的本质是非线性的。但为了分析和研究的简化,并为了突出主要因素的影响,进行单因素线性分析与研究是很有必要的,它也是进行多因素非线性分析与研究的基础。在单因素线性分析与研究的基础上进行多因素非线性分析与研究,是目前渗流力学研究的发展趋势。同时,对非线性问题的继续深入研究必将推动渗流力学的进一步发展。

## 参 考 文 献

- [1] 朱诗鳌. 坝工技术史 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [2] 清华大学高坝大型结构国家专业实验室. “高拱坝设计与计算分析”高级研讨班论文集. 清华大学, 2000.
- [3] 柴军瑞, 刘浩吾. 高拱坝研究新进展. 水利水电科技进展, 2001.
- [4] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.
- [5] 朱岳明. 大坝渗流计算与渗控措施研究综述. 河海科技进展, 1993 (4).
- [6] 祁庆和. 水工建筑物. 北京: 水利电力出版社, 1986.
- [7] 杜延龄, 许国安. 渗流分析的有限元法和电网络法. 北京: 水利电力出版社, 1992.
- [8] D. G. Fredlund, H. Rahardjo, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, New York: John Wiley & Sons, 1993 (中译本: 陈仲颐、张在明、陈愈炯等, 合译, 非饱和土土力学, 北京: 中国建筑工业出版社, 1997).
- [9] 李锡夔, 范益群. 非饱和土变形及渗流过程的有限元分析. 岩土工程学报, 1998, 20 (4).
- [10] J. Bear. Dynamics of Fluids in Porous Media, New York: Elsevier, 1979 (中译本: 李竞生、陈崇希译, 孙纳正, 校, 多孔介质流体动力学, 北京: 中国建筑工业出版社, 1983).
- [11] B. Li, V. K. Garga, M. H. Davies. Relationships for no-Darcy flow in rockfill, Journal of Hydraulic Engineering, (1998) 124 (2).
- [12] B. Li, V. K. Garga, Theoretical solution for seepage flow in overtopped rockfill, Journal of Hydraulic Engng., (1998) 124 (2).
- [13] 沈洪俊, 陆绍俊, 夏颂佑. 堆石坝心墙与防渗墙不同联结方式抗渗性能的试验研究, 长江科学院院报, (1999) 16 (5).