

长江三峡工程

岩石边坡地下水 渗流及排水研究

——永久船闸陡高边坡岩体力学研究（四）



中国建筑工业出版社

**长江三峡工程
岩石边坡地下水渗流及排水研究**
——永久船闸陡高边坡岩体力学研究（四）

哈秋舫 陈洪凯 著

中国建筑工业出版社

(京) 新登字 035 号

三峡工程永久船闸岩体渗流与排水机理是三峡工程一个十分重要的研究课题,是永久船闸边坡稳定与变形综合研究的重要组成部分之一。本书基于对现场岩体结构面的大量调查、渗流量的观测,对渗透结构面进行了综合研究;由极值控制法研究了渗透结构面的渗透系数,以渗流量为控制参数研究了岩体的渗透系数;通过对岩体排水机理的研究,对渗流排水措施进行了优化研究;进而研究了边坡岩体中渗流自由面的发育特性;对边坡开挖卸荷作用对渗流特性的影响进行了初步分析。研究成果具有很强的针对性和实用性。

本书可供从事水利水电、公路、铁路、矿山、国防工程等工程设计的科技人员和从事岩石力学、岩体力学及工程地质水文学地质的人员及大专院校师生参考。

* * *

长江三峡工程

岩石边坡地下水渗流及排水研究

——永久船闸陡高边坡岩体力学研究(四)

哈秋龄 陈洪凯

*

中国建筑工业出版社 出版、发行(北京西郊百万庄)

北京顺义板桥印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 4%插页: 1 字数: 123 千字

1997 年 9 月第一版 1997 年 9 月第一次印刷

印数: 1—1,050 册 定价: 10.30 元

ISBN 7-112-03058-7

TU·2346 (8590)

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)

前 言

18 世纪中叶, H.Darcy 通过试验总结出了著名的 Darcy 定律。100 多年来, 基于 Darcy 定律建立的经典渗流理论发展迅速, 已经成为流体力学的一个重要分支。然而, 由于经典的渗流理论是以连续介质(土体)假定为基础的, 而众多的工程事例和科学研究表明, 岩体渗流与土体渗流有着本质的区别。虽然前苏联学者 ЛОМН 于本世纪 50 年代中期就系统地发表了一份具有开创性的关于裂隙岩体渗流的研究报告, 但是直到 1959 年 12 月结构设计合理、施工质量精良的法国 Mallpasset 拱坝(坝高 66.5m)和 1963 年意大利 Vajont 拱坝(坝高 262m)的失事, 岩体渗流才逐渐得到工程界的重视。70 年代中期以来, 裂隙岩体渗流已开始作为“岩体水力学”进行研究。

在水利水电、矿山、石油、公路、铁路和国防等工程建设中, 经常会遇到各种各样的岩体力学问题。岩体破坏的类型主要包括由于岩体不均匀变形和岩体失稳而造成的破坏。无论是坝基、边坡及路基等的破坏, 渗流均起着非常重要的作用。地下水在岩体中的存在及活动, 强烈地影响着岩体的变形和稳定。据不完全统计, 约 90% 的自然边坡和人工边坡的破坏与地下水的活动有关, 30%~40% 的大坝失事与岩体渗流有关。因此, 加速岩体渗流的研究迫在眉睫。迄今, 国外学者在裂隙岩体渗流的计算模型、渗透系数、渗流数值模拟和力学、变形与渗流耦合等方面的研究均取得了令人瞩目的成就; 国内 80 年代初才逐渐开展岩体渗流的研究, 10 多年来, 在渗流的计算方法、试验方法及渗流与应力的耦合作用等方面取得了长足的进展。

“七五”国家重点攻关项目“三峡船闸陡高边坡开挖加固技

术研究”对三峡船闸岩体渗流进行了研究，在岩体渗透系数及渗流场方面取得了许多有益的成果。但是，介于三峡工程永久船闸区岩体具有典型的各向异性特性、岩体结构面有张压之分，不能用等效介质进行岩体渗流分析，应强调对渗透结构面的分析研究；边坡岩体排水措施应基于对排水机理的研究而进行，强调排水问题；况且，由于已实施的永久船闸方案（Ⅵ线）较“七五”研究方案（Ⅲ线）北移 300m，可供工程直接使用的前期渗流与排水研究成果很粗且少。有鉴于此，在“八五”国家重点科技攻关项目“三峡工程永久船闸陡高边坡关键技术研究”中继续对此问题进行了深入研究。

基于对现场岩体结构面的大量调查、渗流量的观测，对渗透结构面进行了综合研究；由极值控制法研究了渗透结构面的渗透系数，以渗流量为控制参数研究了岩体的渗透系数；通过对岩体排水机理的研究，对渗流排水措施进行了优化研究；进而研究了边坡岩体中渗流自由面的发育特性；对边坡开挖卸荷作用对渗流特性的影响进行了初步分析。研究过程以岩石力学系统工程方法论为指导思想，重点研究了稳定渗流与排水问题，而非稳定渗流与非稳定排水机理、渗流与应力的耦合作用正在研究过程之中，将于不久作为另一专著出版。

本书是作者多年从事水电工程经验及近几年针对三峡工程永久船闸岩体渗流具体研究工作的阶段性总结，希望得到同行专家的指正和帮助。

著 者

1996.10

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 工程概况、特点及要求	1
1.2 工程地质水文地质条件概述	5
1.3 岩体渗流与排水研究的目的和意义	7
第 2 章 岩体渗流与排水研究现状概述	10
2.1 国内外岩体渗流与排水研究现状及评述.....	10
2.2 三峡船闸边坡岩体渗流与排水研究现状.....	24
2.3 本书研究的范围、思路和方法.....	32
第 3 章 渗透结构面研究	36
3.1 渗透结构面的提出及意义.....	36
3.2 渗透结构面的总体特性.....	37
3.3 渗透结构面研究方法.....	39
3.4 渗透结构面的研究成果及分析.....	40
3.5 本章小结.....	46
第 4 章 裂隙岩体渗流测试及渗透系数研究	48
4.1 概述.....	48
4.2 岩体渗流宏观特性研究.....	49
4.3 现场测试方法及方案布设.....	54
4.4 岩体渗流量测试成果分析.....	55
4.5 渗透结构面的渗透系数研究方法 与成果分析.....	58
4.6 岩体渗透系数的研究方法与成果分析.....	64
4.7 本章小结.....	76

第 5 章 岩体渗流排水机理研究	78
5.1 船闸边坡山体排水系统设计方案概述	78
5.2 排水孔排水性态分析	81
5.3 渗流排水计算模型分析	84
5.4 排水机理分析方法	86
5.5 渗流排水计算成果分析	89
5.6 本章小结	91
第 6 章 岩体渗流排水措施优化研究	92
6.1 概述	92
6.2 山体排水孔优化布设方向研究	92
6.3 山体排水系统优化布设方案研究	93
第 7 章 各向异性岩体渗流自由面研究	96
7.1 概述	96
7.2 渗流自由面的研究方法及其改进	97
7.3 船闸边坡渗流自由面分析模型	108
7.4 渗流自由面的有限元数值模拟	110
7.5 本章小结	112
第 8 章 船闸边坡开挖卸荷作用及其对渗流特性的影响	113
8.1 概述	113
8.2 应力状态及其变化与岩体渗透特性的关系研究现状分析	114
8.3 船闸开挖的边坡岩体卸荷特性研究	119
8.4 卸荷作用对岩体渗流特性影响的探讨	124
8.5 本章小结	127
第 9 章 结论及建议	128
9.1 结论	128
9.2 建议	130
参考文献	132

第 1 章 绪 论

1.1 工程概况、特点及要求

1.1.1 工程概况

三峡工程永久船闸是三峡工程的重要组成部分，是目前世界上最大的通航建筑物之一。它位于三峡工程坝址的左岸山体中，线路上起祠堂包，下迄坝河口，总长 6442m，其中上游引航道长 2113m，闸室段长 1617m，下游引航道长 2712m。距现长江河岸约 1600m，在此区域内，长江为一河曲，左岸为凸岸，地面高程由河岸约 60m 向左逐渐增高至 260m（坛子岭），过坛子岭后局部较低，然后往左继续增高至 360m。沿岸溪沟发育，将地形切割成大小不同的山梁，大岭～坛子岭为地形分水岭，地形循东、南、西三个方向降低。河道在上游经约 3km 直线段后与太平溪弯道相接，下游经约 4km 后与乐天溪弯道相接。永久船闸的实施方案采用的是轴线方向为 111° 的双线五级连续船闸（图 1.1），单级闸室有效尺寸为 $280(\text{长})\text{m} \times 34(\text{宽})\text{m} \times 5(\text{水深})\text{m}$ ，五级闸室总长 1617m，各级闸室纵剖面如图 1.2 所示。船闸布置在深开挖的花岗岩岩体中，两侧采用较陡的边坡，根据岩体的风化程度不同，采用不同的边坡开挖坡度，全强风化带 $1:1 \sim 1:1.5$ ，弱风化带 $1:0.5$ ，微风化及新鲜岩体带 $1:0.3$ ，闸室部分的边墙为直立（高 40～50m）；边坡的最大开挖深度达 170m（位于第三闸首附近，约 400m 长），其余一般 50～120m。因此，三峡工程永久船闸就是处在这样一个既高又陡的深槽内。

1.1.2 工程特点及要求

一、特点

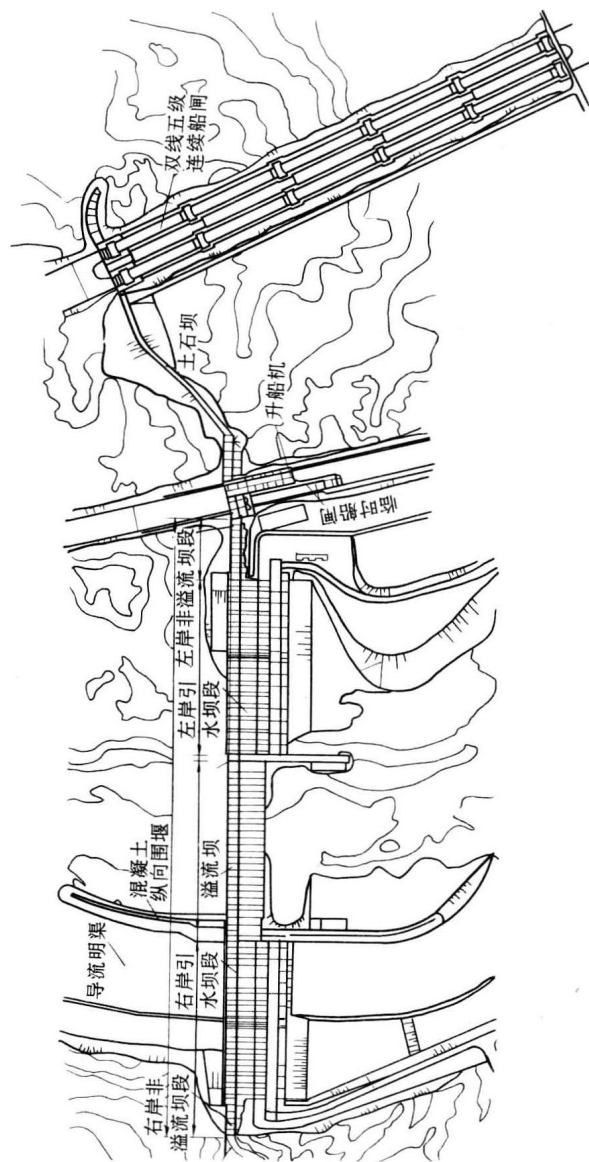


图 1.1 三峡枢纽平面布置图

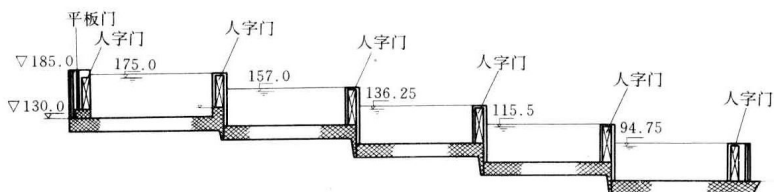


图 1.2 三峡枢纽连续五级船闸剖面图

(1) 尺度大

三峡工程永久船闸闸室段长 1617m，有效尺寸 280m × 34m × 5m，处于花岗岩岩体深开挖的槽谷内，最大边坡开挖高度 170m，其余 50~120m；边坡开挖坡度 30°~90°（是世界罕见的长、大、陡高边坡工程）。

(2) 岩体各向异性明显

虽然工程所处基岩主要为闪云斜长花岗岩，但从微观结构上看，组成岩石的造岩矿物分布非常不均匀，具有典型的岩性各向异性；此外，岩体中各种岩脉、断层及节理、裂隙等岩体结构面也特别发育，尤其是多陡倾角岩体结构面，表现出典型的构造各向异性。二者共同组成岩体各向异性，以构造各向异性为主（图 1.3、图 1.4）。岩体各向异性导致了岩体力学及水力学参数的各向异性，进而控制着岩体力学及水力学性态及其变化（图 1.5）。

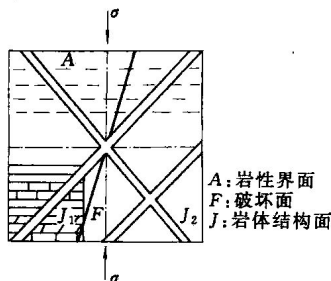


图 1.3 岩体各向异性模型



图 1.4 永久船闸边坡岩体结构

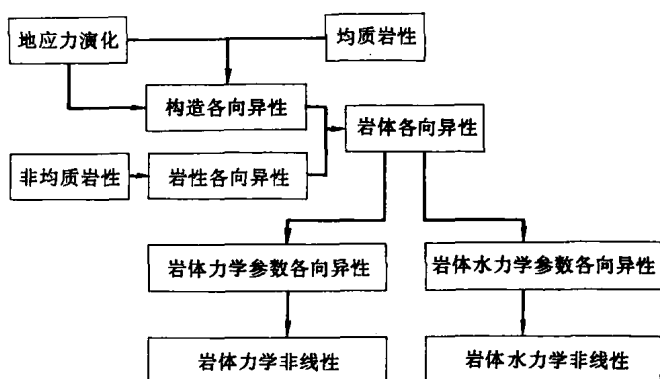


图 1.5 岩体各向异性组成及作用流程图

(3) 岩体水平卸荷特性显著

研究表明，三峡工程永久船闸区属于典型的中、高地应力区，因此，在边坡的形成过程中，卸荷过程是明显的。长江河谷地貌的发育，使工程所处的黄陵背斜闪云斜长花岗岩岩体循东、西、南三个方向卸荷，以偏南方向为主，属于岩体自然卸荷过程；而随着船闸的深切开挖，边坡的不断形成，产生快速的人为卸荷过程，优势方向与船闸边坡倾向一致。自然卸荷和人为卸荷过程的耦合，体现出区内岩体卸荷特性的典型性。

二、要求

(1) 边坡稳定

三峡工程永久船闸陡高边坡下将有大型船队通航，且常年有人群活动，安全要求很高，包括对边坡岩体的总体稳定和局部块体与岩体稳定的要求；

(2) 不得发生有害的时效变形

由于船闸高边坡下安装有大量的、尺寸很小的、精度要求很高的金属结构闸门和大型起闭机等机电设备。为使这些闸门及机电系统在船闸营运期间能够正常运行和使用，要求高边坡不得有太大的有害变形，不得有超过金属结构标准的流变量。

1.2 工程地质水文地质条件概述

1.2.1 地形地貌特征

永久船闸跨越长江三斗坪地区左岸山体和河漫滩两大地貌单元。区内主要山脊为大岭，呈近南北向通过第三闸首，地面高程260~280m，以此为地表分水岭，地形向东、西两侧逐渐降低，为一半岛形高丘地形。分水岭两侧沟谷发育，其走向大多与船闸轴线斜交。大岭以西，地势北高南低，山脊高程210~250m，山坡坡度 20° ~ 30° ，屈家湾沟底高程170~200m，沟宽40~80m，沟梁相对高差20~40m；大岭以东，地势南高北低，山脊高程自250m渐降至130m，山坡坡度除大岭东坡为 30° ~ 40° 外，其余均小于 20° ，四条沟自西向东汇入许家冲，沟底高程90~120m，谷宽30~50m，沟梁相对差高20~50m（图1.6）；迄1996年4月永久船闸第一~四闸室及北坡全景见图1.7。

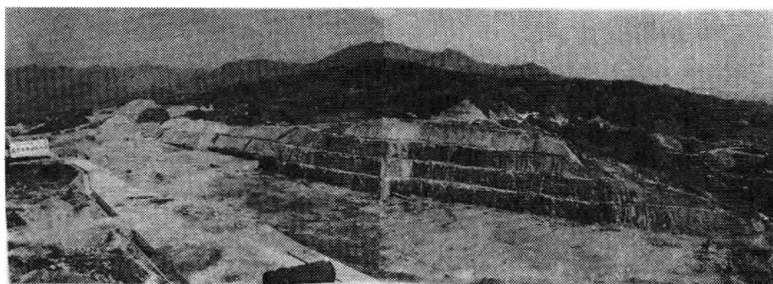


图 1.7 永久船闸第一~四闸室北坡全景图
(1996.4.21, 开挖底板高程: 170m)

1.2.2 岩性特征

永久船闸区出露基岩为震旦纪结晶岩，按其产状可分为基岩、捕虏体及脉岩。

(1) 基岩

闪云斜长花岗岩呈岩基产出，以中、粗粒结构为主。岩性坚

硬，呈块状岩体结构，是闸室段的建基岩体。

(2) 捕虏体

片岩捕虏体呈带状出露于大岭东坡，横穿三闸室段，走向 $340^{\circ}\sim 360^{\circ}$ ，倾向 SW，倾角 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ ，与围岩呈紧密接触。微新片岩，其物理力学参数与微新花岗岩相当。

(3) 脉岩

以细粒花岗岩和辉绿岩脉为主。其走向与永久船闸轴线交角一般在 60° 以上，多为陡倾角。脉岩均为坚硬岩石，其强度与闪云斜长花岗岩相当。与围岩呈紧密接触，少数为裂隙接触。

1.2.3 断裂构造

(1) 断层

闸室段断层按走向分为四组，按其发育程度依次为 NE-NEE、NNW、NNE、NW，与船闸轴线交角均在 40° 以上。倾角 $60^{\circ}\sim 85^{\circ}$ 。构造岩一般胶结较好，少数胶结差，个别有软化现象。

(2) 裂隙

按走向可分为四组，其概化优势面走向为 NEE、NNE-NE、NNW-NE、NWW，与船闸轴线交角在 40° 以上，其中陡倾角、中倾角和缓倾角分别占 74%、19% 和 7%。裂隙面以平直稍粗型为主，60% 为钙质及绿帘石充填，其余为无充填。

1.2.4 地应力

地应力是工程建设中进行力学研究及岩体水力学研究的重要参数，其最大主应力方向与地质构造演变的晚近期区域构造应力场（新构造应力场）紧密相关。地壳表层工程活动区的地应力，由于受地形和地质构造的影响，引起应力的二次重分布，使工程开挖范围区的主应力方向呈 NNE 与 NNW 向的复杂变化。

地应力场主方向在近地表层为 $NE50^{\circ}$ 左右，向下深 600m 以下时为 NNW 向，量级 17MPa。

1.2.5 岩体风化作用

永久船闸风化岩体自上而下可分为全、强、弱、微四个风化

带。其中弱风化带又可以分为弱风化带上部和弱风化带下部两个亚带。全、强、弱风化带统称为风化壳。第1、2、3、4、5 闸室风化壳的平均厚度分别为 30.49m、9.86m、37.09m、35.34m 和 35.34m，而全强风化带的平均厚度分别为 15.69m、16.74m、17.60m、14.92m 和 15.37m。

1.2.6 水文地质条件

船闸区位于亚热带季风气候区的鄂西暴雨区，宜昌站多年平均降水量 1147mm，多集中在 5～9 月，以暴雨为主，日最大降雨量 386mm，1 小时最大降雨量为 101.6mm，多年平均水面蒸发量 800～1000mm。多年平均气温 16.9℃，极端最高气温 42℃，极端最低气温 -9℃。本区地表水主要靠大气降水补给，地表分水岭以大岭为界，地表水分别向东、西两侧沿着发育的沟谷排入长江。

本区的地下水以大气降雨入渗为主，通过全风化岩体和一些透水性较好的结构面入渗地下。钻孔水位长期观测资料表明，地下水分水岭与地表分水岭基本一致。地下水主要分布于弱风化带内，其埋藏深度：在山脊为 24～33m，山坡为 10～25m，沟谷为 7～14m；水位年变幅：山脊为 2.9～6.5m，山坡为 8.1～9m。最高地下水位出现在当年暴雨季节的期末，即 8 月下旬至 9 月上旬，最低水位出现于次年 5 月上旬。地下水的变化一般滞后降水 10～20 天。

1.3 岩体渗流与排水研究的目的和意义

岩体是指富含有一系列软弱面及裂隙（通称岩体结构面）的天然地质体。成岩作用及成岩环境的差异造就了岩体的物质基础和宏观结构与微观结构上的非均质性、各向异性和不连续性，辅之以不同的地应力环境及其变化，形成了岩体中大量方向不同、尺寸各异的岩体结构面。岩体结构面是岩体中强度较低、抵抗变形能力较弱的部分，是岩体各向异性特性的基础，导致了岩体整体力学性质的显著弱化及复杂的渗流特性。进而严重地影响着岩

体中地下水的排水过程及效果。由闪云斜长花岗岩组成的三峡工程永久船闸区岩体，岩体结构面十分发育，尤其是陡倾角的岩体结构面，使区内岩体具有十分显著的各向异性特性。由于岩体边坡中的地下水可以减小潜在破坏面的抗剪强度，张裂缝中的地下水产生的动水压力及静水压力可以显著地增大致滑力。因此，岩体中有地下水可以增加岩体结构面中的水压力、降低岩体结构面的抗剪强度，严重地影响着边坡的稳定性。据 Hoek 和 Bray (1983) 的研究，边坡饱水时的安全系数比边坡干燥时降低 0.5 ~ 0.8。总体而言，降雨对边坡的不利影响主要表现在两个方面：降低岩体强度和抬高地下水位。但是应该具体问题具体分析（张有天等，1995）。

首先讨论关于岩体强度问题，对于边坡稳定分析而言，起控制作用的是岩体结构面的强度。岩体结构面可以分为硬质结构面（或无充填结构面）和软弱结构面。水对前者强度的影响不甚显著，此结论已为岩石力学及工程学界所公认；而对于后者，结构面中的充填物遇水进一步软化，其抗剪强度显著降低，但是只有当充填物的含水量显著增大时才如此。如龙羊峡虎山坡，底孔泄水前因区内年降雨甚小，山体处于干燥状态，稳定性好；而在泄水以后，因泄流雨雾的长期作用，岩体含水量急剧增加，致使岩体强度大幅度降低。而对于含水量较高的岩体，充填物经常处于准饱和状态，一次新的降雨使其含水量增加的量值有限，故而其强度减小幅度不大。

此外，一次降雨使山体地下水位升高的幅度尚与水文地质条件关系密切。当山体山坡较缓且地下水位在弱风化层以上时，由于岩体的空隙率大，水位上升所需供给水量较多，同样的降雨条件下水位上升的幅度小。同时由于裂隙发育，岩体破碎，渗透系数大，水位升高后水体易于排泄，此乃众多山体中洪枯水位变幅不大之原因。

从渗流观点分析，对于岩体而言，降雨从地面入渗，在重力作用下，首先以较快速度沿裂隙向下流动，再缓慢地由裂隙渗入

岩块孔隙系统内。由于岩体的风化程度自地表向下减弱，雨水于地表易于渗入裂隙中，而从深部岩体中排走则十分困难。因此，若一个降雨过程不太短，便易于在山体地下水位以上非饱和区中形成瞬态饱和区，在充满水的裂隙内产生较大的孔隙压力。虽然此一孔隙压力是暂态的，降雨停止后便快速消散，但是由于量值较大，且作用于山体顶部，对边坡稳定性更为不利。如五强溪船闸边坡，这种瞬态饱和孔隙压力便是边坡变形的主要荷载。

综上所述，岩体渗流是岩体高边坡岩体力学综合研究中一个重要的研究内容。国内外大量的实践经验表明，排水与加固的联合使用可以达到最佳的边坡治理效果。永久船闸陡高边坡岩体渗流与排水的前期研究成果业也表明，岩体中的地下水是影响船闸陡高边坡稳定性的主要原因之一。基于此，在“八五”国家重点科技攻关项目“三峡工程永久船闸陡高边坡关键技术研究”(85-16-03-05(3))中“岩体渗流与排水研究”(85-16-03-05(3)-05)是一个重要的研究内容，其目的在于比较客观地认识船闸边坡岩体中地下水的赋存特性、渗流过程，据此重点研究边坡岩体中地下水的排水机理及过程，并提出较为合理的地下水排水措施，具有重要的工程实用价值，并丰富了岩体水力学的研究方法和研究内容。

第2章 岩体渗流与排水研究现状概述

2.1 国内外岩体渗流与排水研究现状及评述

虽然前苏联学者 JIOMN 于本世纪 50 年代就系统地发表了一份具有开创性的关于裂隙岩体渗流的研究报告,但是直到 1959 年 12 月 2 日结构设计合理、施工质量精良的法国 Mallpasset 拱坝(高 66.5m)和 1963 年意大利 Vajont 拱坝(高 262m)的失事,岩体渗流才逐渐得到工程界的重视, Mallpasset 坝的破坏主要是左岸坝基破坏所致。破坏楔体由三个面组成:平面 1 为坝基中向下游倾斜的片麻岩,且为一先成断层;平面 2 为由 80cm 厚的糜棱岩组成的向上游倾斜的软弱夹层;平面 3 则是由平面 1 和平面 2 的破坏而产生的拉裂面,其诱发了拱坝的水平剪切断裂。地下水在该坝的破坏过程中具有重要作用。

Londe (1987)、Wittke (1987) 和 Poisel 等在 Mallpasset 破坏机理方面的研究作出了很大的贡献。认为其破坏类型属于旋转变形破坏。从等效连续模型和离散模型两个方面进行了对比研究。Wittke (1987) 在利用连续模型用有限元法进行数值分析时,考虑了岩体的渗透性、各向异性及复杂的应力应变关系(图 2.1)。结果表明,当考虑渗透力及上浮力时,垂直于平面 1 的岩体产生明显的拉应力。平行于片麻岩的断层中渗透性增加,其值为库水位的全静力水头值,在库水水平推力、渗流力、坝基重力的综合作用下,由平面 1 和平面 2 组成的坝基楔形体沿平面 2 向斜逆冲,使软弱夹层的剪应力超过其抗剪强度面拽动其上坝体发生反时针旋转,进而使位于坝基上部的坝体与右岸坝体之间发生剪切,在坝体中产生Ⅲ型断裂裂纹而形成平面 3,三个面的组合诱