



# 临海渗流地震作用导流堤围堰 施工空间力学特性研究

——以渤海红沿河核电站取水导流工程为例

---

芮勇勤 李永林 周 基 赵红军 著



東北大學出版社  
Northeastern University Press

# 临海渗流地震作用导流堤 围堰施工空间力学特性研究

——以渤海红沿河核电站取水导流工程为例

芮勇勤 李永林 周 基 赵红军 著

东北大学出版社

· 沈 阳 ·

© 芮勇勤 李永林 周 基 赵红军 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

临海渗流地震作用导流堤围堰施工空间力学特性研究/芮勇勤等著. —沈阳: 东北大学出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-5517-0702-2

I. ① 临… II. ① 芮… III. ① 导流—工程施工 ② 围堰—工程施工 IV. ① TV551

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 160488 号

内 容 简 介

随着我国国民经济建设的快速发展, 能源需求迅速增长, 发展清洁环保的核电能源可以促进地区产业结构的升级, 增强我国综合国力。加快核电建设、积极发展核电是保障国家能源安全的迫切需要。核电站循环冷却取排水系统建设安全级别高, 可见取水工程的安全性、可靠性极为重要。应结合工程实际情况和特点, 对导流堤围堰施工阶段的渗流场演化和力学特性进行分析, 并应用于实体工程, 保证施工安全。本书旨在提高在校大学生、研究生解决实际工程问题的能力和水平。全书共分 10 章, 主要分析了取水口导流堤围堰工程及方案选择、导流堤围堰实体仿真空间建模技术、强度折减与地震作用导流堤围堰稳定性、导流堤围堰流固耦合空间力学特性分析和导流堤围堰工程施工监测与检测等。

本书取材实际, 简明实用, 系统性强, 是一本具有实用价值的工具书。既可以作为大专院校的选修教材, 也可以供相关领域工程技术人员自学参考。

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph@neupress.com

http: //www. neupress. com

印 刷 者: 廊坊市文峰档案印务有限公司

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 12. 25

字 数: 321 千字

出版时间: 2014 年 9 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 9 月第 1 次印刷

策划编辑: 王兆元

责任编辑: 王延霞

责任校对: 铁 力

封面设计: 刘江阳

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-0702-2

定 价: 37.00 元

## 前 言

随着我国国民经济建设的快速发展,能源需求迅速增长,发展清洁环保的核电能源可以促进地区产业结构的升级,增强我国综合国力。因此,加快核电建设、积极发展核电是保障国家能源安全的迫切需要。建设中的环渤海第一座滨海核电站——红沿河核电站,运营需要大量提取海水,冷却常规岛、核岛及厂区淡化用水。核电站循环冷却取排水系统建设安全级别高,可见取水工程的安全性、可靠性极为重要。应结合工程实际情况和特点,对导流堤围堰施工阶段的渗流场演化和力学特性进行分析,并应用于实体工程,保证施工安全。

临海渗流地震作用导流堤围堰施工空间力学特性研究以辽宁红沿河核电厂为例。辽宁红沿河核电厂位于辽宁省瓦房店市东岗乡林沟村小孙屯,地处瓦房店市西端渤海辽东湾东海岸温坨子。厂区规划装机容量为6台 $\times 1000\text{MW}$ 级机组,分两期建设,本期建设4台 $\times 1000\text{MW}$ 级的CPR1000机组。本期工程每台机组的设计取水量为 $50.1\text{m}^3/\text{s}$ ,4台机组共用一座取水建筑物取水,并通过4条取水隧洞引至厂区。电厂厂址地形条件是北高南低,结合厂区总体布置,本期工程的取水建筑物位于电厂北部约1.0km的天然小海湾内,取水建筑物长118.8m,宽47.5m,底标高-12.0m,顶标高8.0m,取水区域自然地面标高-4~-3m,基本位于渤海辽东湾海域。根据海冰、海浪、泥沙及漂浮物的物理模型试验,修建导流堤可对北向来的强浪和海冰等进行有效的遮蔽,所以在进水口北侧修建导流堤。为了给取水建筑物的干施工和取水明渠干挖创造条件,需设置施工围堰。施工设计中推荐采用施工围堰与导流堤相结合的方案,该方案不但可减少工程总投资,并且能创造较大的干施工场地。

本书共分10章,主要研究工作如下。

### (1) 导流堤围堰工程研究评述

针对国内外研究现状,在重点研究导流堤围堰工程、导流堤围堰渗流机理研究、流固耦合分析技术和导流堤围堰防渗方法等的基础上,确立了研究思路与启示,建立了研究内容和技术路线。

### (2) 取水口导流堤围堰工程及方案确定

结合导流堤围堰工程,开展导流堤工程选择、施工围堰方案选择方案对比,进行了取水口导流堤围堰方案的确定,以及导流堤围堰防渗墙方案的确定。

### (3) 临海导流堤围堰渗流与海浪海冰冲击影响

利用Geo-Studio软件和建立有限元模型,进行导流堤围堰渗流特征分析、海水涌浪冲击影响分析、海浪抽吸影响分析和海冰撞击影响分析,初步提出了导流堤围堰防渗施工控制方法,以及导流堤围堰防护施工方法。

### (4) 导流堤围堰实体仿真空间建模技术

利用SolidWorks软件和MIDAS/GTS软件,开展了导流堤围堰与海潮演化仿真建模,实现了针对现场施工情况的取水口原始地形生成、取水口实体模型建立、取水口海潮变化仿真和导流堤围堰仿真空间建模。

### (5) 强度折减与地震作用导流堤围堰稳定性

通过 Phase2D 软件和有限元强度折减与地震响应分析方法,进行了导流堤围堰有限元强度折减稳定性分析和围堰施工阶段地震影响稳定性分析。

### (6) 导流堤围堰稳定性与防渗墙应力分析

针对导流堤围堰地基试验与稳定性分析工况,开展临时围堰与导流堤地基中砂试验,选择确定临时围堰与导流堤计算内容与地震动输入参数,开展静力条件下导流堤和临时围堰应力分析、施工二期遭遇地震时导流堤和临时围堰结构分析、地基中砂的液化分析和极限平衡拟静力法稳定分析。

### (7) 导流堤围堰流固耦合空间力学特性分析

在形成渗流场与应力场耦合有限元方法和导流堤围堰流固耦合有限元模型建立的基础上,进行了导流堤围堰渗流规律分析、导流堤围堰流固耦合力学特性分析。

### (8) 导流堤围堰施工设计与组织

在总体设计施工中设计原则、设计标准、平面布置与堤体设计、地基处理与石料、混凝土、塑性混凝土防渗墙和总体施工顺序确立的基础上,进行施工组织中的堤心石抛填施工、规格石抛理、护面块体预制、护面块体运输、安装、钻孔施工、防渗墙施工、现浇防浪墙及面层混凝土施工、干砌块石施工和浆砌块石施工规划。

### (9) 导流堤围堰工程施工监测与检测

分别对场地岩体风化程度和完整性进行划分、场地地基承载力评价和场地稳定性与适宜性评价。针对导流堤围堰工程施工测量控制和测量检验,建立了施工沉降、位移监测中的沉降观测目的和内容:测量仪器和测量等级要求,水准网、平面网、监测点的设置和要求,观测频率,导流堤围堰工程沉降位移的评价。利用探地雷达原理与检测方法,在建立雷达探测数据处理方法和建立探地雷达波相识别的基础上,对导流堤围堰和导流堤围堰内侧冰水探测与评价。

### (10) 结论与展望

本书取材实际,简明实用,系统性强,既可以作为大专院校的选修读物,也可以供相关领域工程技术人员用作技术参考。

在本书的编写过程中,借鉴了一些相关的施工设计、现场管理和软件应用,在此深表感谢!

特别感谢中广核工程有限公司、中国电力工程顾问集团东北电力设计院、河北中核岩土工程有限责任公司、中交一航局辽宁红沿河核电项目部、中隧集团辽宁红沿河核电项目部、大连理工大学土木水利学院工程抗震研究所、东北大学资源与土木学院土木工程研究所、长沙理工大学公路工程地质灾害研究所给予的支持和帮助。

特别感谢魏伟、王强、熊碧璐、陈国飞等给予的指导和帮助。对吴艳娟、王斌、林晓华、杨斌、刘书智、张旭旭等在本书编写过程中给予的帮助深表感谢!

最后,希望本书在实际工程中的设计、分析和仿真等方面,能给予广大读者启迪和帮助。由于著者水平有限,加之时间仓促,恳请读者对书中的疏漏和错误之处不吝赐教。

著者

2014年5月



## 目 录

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| <b>第1章 导流堤围堰工程研究评述</b> .....        | <b>1</b>  |
| 1.1 问题的提出 .....                     | 1         |
| 1.2 研究目的及意义 .....                   | 2         |
| 1.3 国内外研究现状 .....                   | 3         |
| 1.4 研究思路与启示 .....                   | 16        |
| 1.5 主要研究内容 .....                    | 16        |
| 1.6 研究技术路线 .....                    | 17        |
| 1.7 本章小结 .....                      | 17        |
| <b>第2章 取水口导流堤围堰及方案确定</b> .....      | <b>18</b> |
| 2.1 导流堤围堰工程概况 .....                 | 18        |
| 2.2 导流堤工程选择 .....                   | 25        |
| 2.3 施工围堰方案选择 .....                  | 27        |
| 2.4 导流堤方案选择 .....                   | 28        |
| 2.5 取水口导流堤围堰方案确定 .....              | 30        |
| 2.6 导流堤围堰防渗墙方案确定 .....              | 33        |
| 2.7 本章小结 .....                      | 34        |
| <b>第3章 临海导流堤围堰渗流与海浪海冰冲击影响</b> ..... | <b>36</b> |
| 3.1 Geo-Studio 软件功能及特点 .....        | 36        |
| 3.2 有限元模型建立 .....                   | 36        |
| 3.3 导流堤围堰渗流特征分析 .....               | 40        |
| 3.4 海水涌浪冲击影响分析 .....                | 49        |
| 3.5 海浪抽吸影响分析 .....                  | 51        |
| 3.6 海冰撞击影响分析 .....                  | 54        |
| 3.7 导流堤围堰防渗施工控制方法 .....             | 57        |
| 3.8 导流堤围堰防护施工方法 .....               | 59        |
| 3.9 本章小结 .....                      | 62        |
| <b>第4章 导流堤围堰实体仿真空间建模技术</b> .....    | <b>63</b> |
| 4.1 SolidWorks 软件功能及特点 .....        | 63        |

|            |                                |            |
|------------|--------------------------------|------------|
| 4.2        | MIDAS/GTS 软件功能及特点 .....        | 64         |
| 4.3        | 导流堤围堰与海潮演化仿真建模 .....           | 66         |
| 4.4        | 本章小结 .....                     | 70         |
| <b>第5章</b> | <b>强度折减与地震作用导流堤围堰稳定性 .....</b> | <b>71</b>  |
| 5.1        | Phase2D 软件功能及特点 .....          | 71         |
| 5.2        | 有限元强度折减与地震响应分析方法 .....         | 71         |
| 5.3        | 导流堤围堰有限元强度折减稳定性分析 .....        | 75         |
| 5.4        | 围堰施工阶段地震影响稳定性分析 .....          | 81         |
| 5.5        | 本章小结 .....                     | 89         |
| <b>第6章</b> | <b>导流堤围堰稳定性与防渗墙应力分析 .....</b>  | <b>90</b>  |
| 6.1        | 导流堤围堰地基试验与稳定性分析工况 .....        | 90         |
| 6.2        | 临时围堰与导流堤地基中砂试验 .....           | 91         |
| 6.3        | 临时围堰与导流堤计算内容与地震动输入参数 .....     | 96         |
| 6.4        | 静力条件下导流堤和临时围堰应力分析 .....        | 98         |
| 6.5        | 施工二期遭遇地震时导流堤和临时围堰结构分析 .....    | 103        |
| 6.6        | 地基中砂的液化分析 .....                | 105        |
| 6.7        | 极限平衡拟静力法稳定分析 .....             | 107        |
| 6.8        | 本章小结 .....                     | 112        |
| <b>第7章</b> | <b>导流堤围堰流固耦合空间力学特性分析 .....</b> | <b>114</b> |
| 7.1        | 渗流场与应力场耦合有限元方法 .....           | 114        |
| 7.2        | 导流堤围堰流固耦合有限元模型建立 .....         | 115        |
| 7.3        | 导流堤围堰渗流规律分析 .....              | 117        |
| 7.4        | 导流堤围堰流固耦合力学特性分析 .....          | 128        |
| 7.5        | 本章小结 .....                     | 136        |
| <b>第8章</b> | <b>导流堤围堰施工设计与组织 .....</b>      | <b>137</b> |
| 8.1        | 总体设计施工 .....                   | 137        |
| 8.2        | 堤心石抛填施工 .....                  | 143        |
| 8.3        | 规格石抛理 .....                    | 145        |
| 8.4        | 护面块体预制 .....                   | 146        |
| 8.5        | 护面块体运输、安装 .....                | 147        |
| 8.6        | 钻孔施工 .....                     | 148        |
| 8.7        | 防渗墙施工 .....                    | 148        |
| 8.8        | 现浇防浪墙及面层混凝土施工 .....            | 155        |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 8.9 干砌块石施工 .....                | 155        |
| 8.10 浆砌块石施工 .....               | 156        |
| 8.11 本章小结 .....                 | 157        |
| <b>第9章 导流堤围堰工程施工监测与检测 .....</b> | <b>158</b> |
| 9.1 场地岩体风化程度和完整性划分 .....        | 158        |
| 9.2 场地地基承载力 .....               | 161        |
| 9.3 场地稳定性与适宜性评价 .....           | 162        |
| 9.4 施工测量控制和测量检验 .....           | 162        |
| 9.5 施工沉降、位移监测 .....             | 163        |
| 9.6 探地雷达原理与检测方法 .....           | 167        |
| 9.7 导流堤围堰工程施工地质雷达检测 .....       | 173        |
| 9.8 本章小结 .....                  | 182        |
| <b>第10章 结论与展望 .....</b>         | <b>183</b> |
| 10.1 结 论 .....                  | 183        |
| 10.2 展 望 .....                  | 184        |
| <b>参考文献 .....</b>               | <b>185</b> |



# 第1章 导流堤围堰工程研究评述

## 1.1 问题的提出

近年来,随着我国国民经济建设的快速发展,在能源需求迅速增长的背景下,积极发展清洁环保的核电能源可促进地区产业结构升级,特别是一次能源短缺的沿海、内陆地区,更有必要积极发展核电。因此,加快核电建设、积极发展核电是保障国家能源安全的需要,对我国能源可持续发展、优化能源结构意义重大。

目前,我国能源结构仍以石油、煤炭等化石燃料为主。核电是与水电、火电并列的新能源支柱,很多国家重新把核能作为唯一可实现大规模替代常规能源的、既清洁又经济的现代能源列入发展规划<sup>[1]</sup>。目前世界上有33个国家和地区用核电站发电,核发电量占世界总发电量的17%。各国的核电现状大不相同:有16个国家的核发电量在全国总发电量中的份额接近或超过25%;核发电量所占份额最高者为法国和立陶宛,均超过70%;而我国仅为2.2%,在30个具有核电能力的国家中仅高于印度和巴基斯坦<sup>[2]</sup>。

核电站反应堆运行过程中会产生大量热量,需要保证有充足的冷却循环水源。虽然世界上大多数核电站建在内陆,但是厂址附近都有足够大的湖泊,取水经济,或者机组容量不大。海水取之不尽、用之不竭,并可利用潮汐、海浪和海流等综合作用对直流排出的温排水和低放废水进行稀释扩散,所以建立滨海核电站成为核电产业发展的主要趋势。

目前,我国已建成并运行4座核电站,形成了浙江秦山、广东大亚湾和岭澳、江苏田湾3个滨海核电基地。根据国家核电中长期规划,2020年以前我国新增投产的23000MW的核电站,主要安排在浙江、江苏、广东、山东、辽宁和福建6个沿海省兴建。该地区水电资源相对较少,主力电站以火电为主,调峰能力较差,电网运行不经济,建设核电站是解决当地能源短缺问题的可行方案。

核电站用水安全等级比常规火电厂高,尤其是为核岛服务的安全厂用水系统,水源要求稳定可靠。导流工程是在水利水电工程建设过程中对水流进行控制的关键性施工措施。已建成的大亚湾、岭澳核电站(见图1.1和图1.2)以及在建的红沿河、阳江核电站取水工程均采用导流工程结合取水建筑物形式,其中导流工程采用斜坡土石堤形式。

红沿河核电站是中国首次一次建设4台 $\times 1000\text{MW}$ 级核电机组标准化、规模化建设的核电项目,是辽东湾第一座核电站。

该项目位于我国辽东湾海岸海域,具有其特殊的地域、工程特点:第一,工程海域位于渤海辽东湾的东海岸,三面环海一面向陆,波浪以风浪为主,波浪较大,频率较高,实测H1/10年极值最大波高为4.3m;第二,地理位置偏北,每年冬季都有不同程度的结冰现象,多为漂冰;第三,为保证施工安全与进度、节约成本,在施工期间,导流堤与施工围堰结合构成导流堤围堰工程,保证取水建筑物与取水隧洞的干地施工。

对取水导流工程在寒冷地区海洋环境下的施工阶段、运营阶段的安全性、稳定性研究,成为亟待研究、解决的重要问题。



图 1.1 大亚湾、岭澳核电站取水导流工程卫星影像图

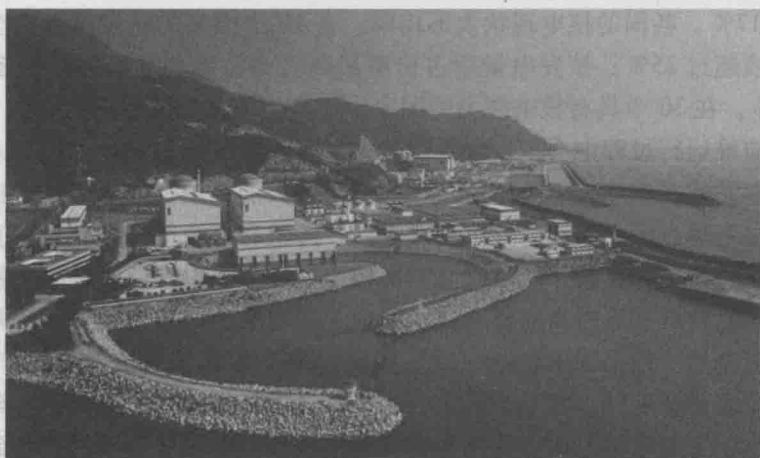


图 1.2 大亚湾、岭澳核电站取水导流工程鸟瞰图

## 1.2 研究目的及意义

### 1.2.1 研究目的

目前,国内对于核电站导流堤工程的设计施工技术和安全评价还没有统一标准,大多是参照水利水电工程围堰的有关规范规定,如《水利水电工程施工手册》《水工建筑物荷载设计规范》(DL 5077—1997)。核电站取水口导流工程面临主导风向和强浪向,起防冰、防沙、消浪、防漂浮物、遮蔽取水建筑物的作用<sup>[3]</sup>,是保证核电站取水建筑物安全运行的必要永久建筑。

施工围堰是保证核电站取水建筑物干地施工的必要临时建筑物,在取水建筑物及取水隧洞施工完成以后拆除。施工围堰与导流堤功能并不相同,但从节省工程成本、缩短工期等方面考虑,可采取两者相结合的方式。本工程导流堤围堰工程采用土石堤(围堰)形式。土石堤(围堰)具有适应条件广、抗震性能好、可就地取材、经济效益好等优点,广泛应用

于水利水电工程中。经过多年的工程经验积累,影响土石堤(围堰)安全的病害主要有<sup>[4]</sup>:漫顶——由于水漫溢、冲蚀坝体致使溃决,漫顶最易使土石坝溃决,一般占溃坝事故的50%左右;渗透变形——此类事故在中小型土石围堰的坝基处最常发生,特别是早期建造的坝,由于勘探、强透水坝基和破碎基岩防渗处理不佳,渗透破坏尤为突出;滑动或液化失稳——由于坝基或坝身的抗剪强度低、边坡陡、孔隙压力高,在静力或动力下均可能失稳,例如,我国湖北南川坝在施工期间黏土坝体大滑坡。

上述病害的存在使得土石围堰工程在发挥巨大功效的同时,安全问题也日益突出。滨海核电站取水导流工程建设在大海中,与内陆堤坝工程相比较,还需考虑海浪、海冰、漂浮物等因素对堤身安全性的影响。应用数值方法研究海水渗流、海浪冲刷、海冰漂浮物撞击对导流堤围堰的影响是解决该问题的有效研究手段。

以红沿河核电站取水导流工程为依托,通过对国内外土石坝设计施工的相关经验的归纳总结,根据依托工程水文地质条件,开展导流堤围堰工程的方案设计研究、数学模型仿真以及数值分析,对导流堤围堰的防渗及力学特性展开分析与研究,为进一步的优化设计和施工提供理论依据,为辽东湾核电站导流工程的建设提供依据与参考。

### 1.2.2 研究意义

我国有广阔的大陆海岸线,长达18000km以上。经过20多年的勘探和规划,确定了相当容量的滨海核电站厂址,为核电发电机组冷却、核安全提供水源保证。

因此,有必要开展红沿河核电站取水导流工程的设计、渗流特性、稳定性等问题的研究。针对取水导流工程在施工、运营期间可能出现的病害,选用合理的评价方法,采取必要的避让、预防及治理措施,保证取水工程安全施工、安全运营。同时,对于提高国家核电、水利水电工程建设水平,推动国家滨海核电事业发展,缓解我国电力紧张的局面,改善工程所在地区的经济状况有重要意义。研究合理有效的设计施工优化方案、模拟施工过程、查改安全隐患,对保证核电站的安全施工及安全生产有着非常重要的现实意义。

## 1.3 国内外研究现状

为了进行辽东湾核电站取水导流工程施工阶段渗流及力学特性研究,对国内外导流工程的发展现状、导流堤围堰渗流机理研究、渗流场与应力场耦合研究以及土石围堰防渗技术的发展等方面进行了大量的调查研究工作。

### 1.3.1 导流堤围堰工程

历史上最早见于记载的导流工程是公元前2900年埃及人在尼罗河上修建的考赛施干砌石坝,坝高15m。

中国于公元前598—前591年在安徽寿县南修筑堤坝形成芍陂灌溉水库,见图1.3。19世纪后期,堤坝建设采用混凝土筑坝。围堰是指在水利工程建设中,为建造永久性水利设施修建的临时性围护堤坝,常用类型如下<sup>[5]</sup>。

#### (1) 土石围堰

早在4100年前,人类便开始了通过大型土石坝工程利用水资源。古代土石坝工程没有理论支持,仅凭经验选料修建,因此大部分古代土石坝工程都发生了溃坝等事故,促使土石坝的设计、施工技术逐步地向着安全和成熟的方面进步<sup>[6]</sup>。土石围堰的抗冲能力较差,且断面尺寸较大,一般适用于横向围堰。在世界绝大多数国家,土石围堰由于其适用



图 1.3 安徽寿县南芍陂灌漑水库

条件广、可就地取材、经济效益好、设计水平高、施工速度快、施工导流易解决、抗震性能强等特点而得到广泛的应用,我国清江水布垭工程、三峡工程均采用土石围堰,见图 1.4 和图 1.5。红沿河核电站取水导流堤围堰工程选用斜坡式土石围堰形式。

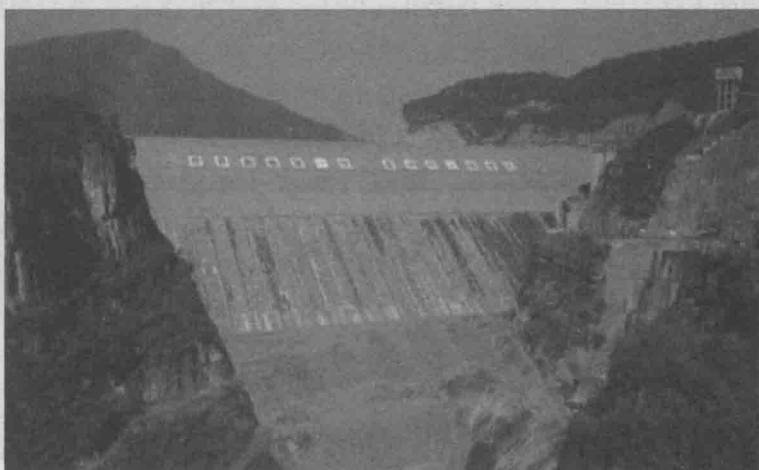


图 1.4 湖北清江水布垭大坝面板堆石坝

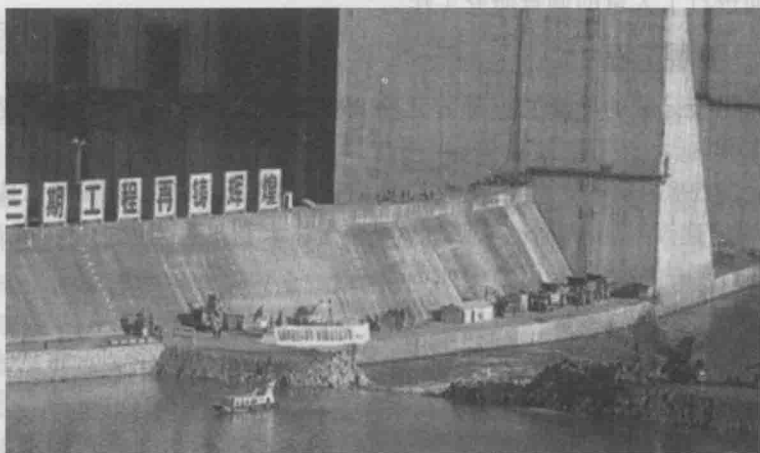


图 1.5 三峡工程二期导流明渠截流土石围堰施工

## (2) 混凝土围堰

混凝土围堰一般建在岩基上,大多为重力式纵向围堰。混凝土围堰具有抗冲能力大、断面尺寸小、易于同混凝土建筑物相连接,并可过水等优点,故在实际施工中也采用较多。

20 世纪 80 年代以来,我国水利工程中的混凝土围堰广泛应用快速施工的碾压混凝土(Roller Compacted Concrete, 简称 RCC)技术,例如,三峡工程三期碾压混凝土围堰,见图 1.6 和图 1.7。

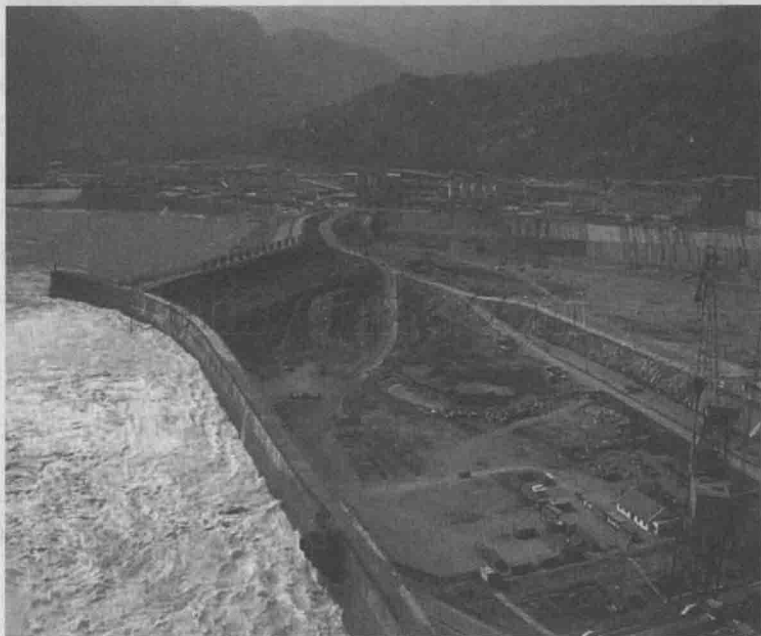


图 1.6 三峡工程三期碾压混凝土围堰侧视图



图 1.7 三峡工程三期碾压混凝土围堰正视图

## (3) 钢板桩隔栅围堰

钢板桩隔栅围堰由一系列彼此连接的钢板桩隔栅体所组成的临时挡水建筑物组成,隔栅钢板桩之间相互扣接并形成封闭空间,封闭空间内填沙、砾石或其他填料以维持稳定,见图 1.8。钢板桩的回收率高达 70%,并具有断面小、抗冲击力强、安全可靠等优点,在



国外水利工程中使用较多,且大多高度超过 30m。

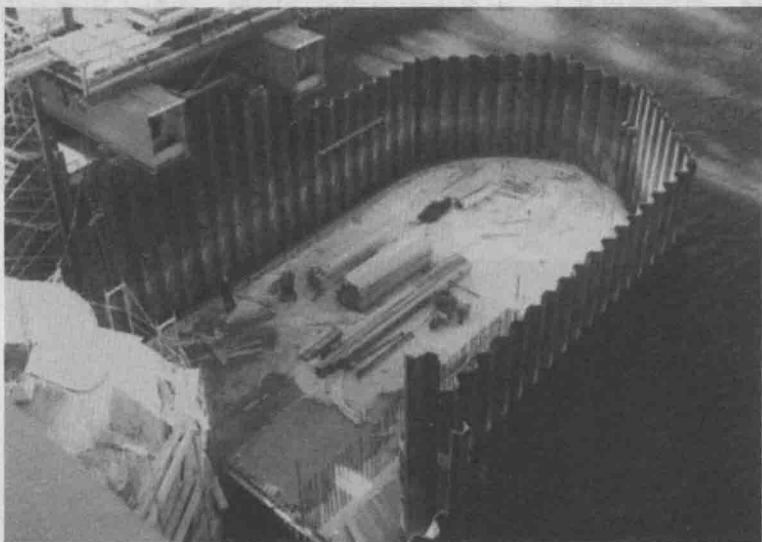


图 1.8 某海洋工程近海钢板桩围堰

#### (4) 其他形式的围堰

木笼围堰、竹笼围堰、草土围堰等围堰形式,一般用于临时结构,现在已很少使用。

### 1.3.2 导流堤围堰渗流机理研究

渗流是作为多个学科的边缘学科发展起来的,是一门由流体力学与岩石力学、土力学、多孔介质理论、表面物理学交叉渗透而形成的学科。

#### (1) Darcy 渗流基本概念

法国水力学家 H. P. G. Darcy 在 1852—1855 年通过大量实验总结出多孔介质渗流规律——Darcy's Law(达西定律),把渗透流速与渗透势能联系在一起,建立了渗透水在土体中流速、水力坡降以及土体性质之间的线性渗透定律<sup>[7]</sup>。

达西定律是由砂质土体试验得到的,以渗透水流为层流为假定条件,具有一定的局限性,因此大量研究者对达西定律的适用范围进行了研究。J. Ohde<sup>[8]</sup>等人从颗粒粒径方面开展了研究。砂土、黏土中的渗透速度很小,其渗流可以看作层流,渗流运动规律符合达西定律,渗透速度与水力坡降为线性关系。

粗颗粒土(如砾、卵石等)由于其孔隙很大,当水力坡降较小时流速不大,渗流可认为是层流,达西定律仍然适用;当水力坡降较大时流速增大,渗流过渡为不规则的相互混杂的流动形式——紊流,这时达西定律不再适用。巴甫洛夫斯基<sup>[9]</sup>得出了适用于达西定律的临界流速,提出了紊流状态时的渗流定律,并于 1889 年推导出渗流的微分方程。

Fancher, Lindquist 等人从  $Re$ (雷诺数)入手对达西定律的适用范围进行了研究<sup>[10]</sup>。一般认为达西定律适用范围为  $Re = 1 \sim 10$ 。当土体孔隙较大或水力坡降较大时水流的  $Re$  很大,必须考虑惯性力的影响,则渗流速度与水力坡降为复杂的非线性关系,即 Non-Darcy Flow(非达西流/非线性流)。1962 年,Swartzendruber 通过对前人关于流体饱和和多孔介质中非达西流动性状分析资料的研究,提出非达西渗流一维流动方程。1968 年,Imray 应用最小梯度概念对达西定律进行补充,基于对黏土渗流特性的研究,指出当实际水力坡降小于初始梯度时流体不发生流动,该现象称为非牛顿流<sup>[11]</sup>。



## (2) 稳定渗流与非稳定渗流

渗流理论发展中遇到的问题之一是稳定渗流与非稳定渗流问题。稳定渗流分析是岩土内、外边界条件不随时间变化的分析,分析区域内的流入量和流出量始终保持不变。

Dupuit 以达西定律为基础推导出地下水流向井孔的平面稳定渗流公式 Dupuit Formula<sup>[12]</sup>,其假定条件是:含水层是均质、各向同性、等厚、水平;地下水为稳定状态的层流运动,遵循达西定律;地下水静止水位水平;抽水并具有圆柱形定水头边界;含水层顶底板隔水,无越流存在。Dupuit Formula 提出后的很长一段时期,地下水水力学的发展限定在稳定渗流理论的范围内。

但随着地下水工程规模逐渐扩大,稳定渗流理论已无法解决全部的工程实践问题。1935年,美国学者 C. V. Theis 在数学家 C. I. Lubin 的帮助下,导出定流量抽水时的单井非稳定渗流计算分式——Theis 公式<sup>[13]</sup>,其假设条件为:含水层为等厚且均质各向同性而无限延伸的;钻井井径为无穷小的完整井。1940年, C. E. Jacob 在研究弹性承压含水层考虑水体的压缩及介质孔隙的压密条件时,推导得到地下水运动的基本微分方程,由 H. H. Cooper 补充完善,地下水渗流的研究从稳定渗流进入了非稳定渗流阶段。

Theis 公式的基本假设在自然界是很难实现的,我国学者陈崇希<sup>[14]</sup>经研究提出:Theis 公式可直接用于初始渗流场为稳定渗流的情况;当初始渗流场为非稳定渗流时,抽水期间地下水水力坡降为天然水头动态降深和抽水自身引起的降深两部分的叠加结果,然后使用 Theis 公式。

## (3) 饱和渗流与非饱和渗流

渗流理论发展中的另一个问题是饱和渗流与非饱和渗流问题。非饱和区域泛指从完全干燥状态到完全饱和状态的区域。饱和度在 100% 以下时,土壤颗粒之间的孔隙除了水以外还存在空气,饱和度非常低时水珠将以凹状附着在土壤颗粒间。随着饱和度的降低,孔隙水压因为表面张力的影响逐渐发展成张力(负孔隙水压),也称为吸入压力(Suction Pressure),一般饱和度越低吸入压力越大。

Buckingham, Richard, Childs 和 Collis-George 等人的研究表明,达西定律适用于非饱和和土体地下水渗流<sup>[15]</sup>,但非饱和土体的渗透系数是非饱和土含水量或基质吸力的函数。1935年, Richards 描述了非饱和土体中水的渗流规律,称为广义达西定律:非饱和土体中的水流量与土水力坡降成正比,两者之间的比值称为导水率。1973年, Neuman 提出一维非饱和渗流计算的有限元法,并与 1974 年提出二维饱和-非饱和渗流计算的有限元分析方法。1979年, Akai 提出三维饱和-非饱和渗流的有限元方法。

Freeze<sup>[16]</sup>, Papagiannakis 和 Fredlund<sup>[17]</sup>等人研究表明,在饱和与非饱和区之间有着连续的水流运动。常规的渗流分析主要考虑饱和区域内水的渗流规律,而工程上遇到越来越多的非饱和土病害问题,非饱和土体的渗流问题引起了工程师及学者们广泛的兴趣。

## (4) 渗流基本方程式

### ① Darcy 渗流理论基本方程。

达西定律起源于饱和土的渗透分析,其基本表达式为<sup>[18]</sup>:

$$q = kJ = -k \frac{dH}{ds}$$

式中,  $q$ ——单位面积的渗透流量;

$k$ ——土体渗透系数;

$J$ ——渗透比降(水力坡降);

$H$ ——流场中测压管水头，是压力水头和位置之和：

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + z \quad (1-1)$$

式中， $u_w$ ——空隙水压；

$\gamma_w$ ——水的密度；

$z$ ——标高。

## ② 三维渗流基本方程式。

根据达西渗透定律，假定渗流过程中土体不可压缩，单位时间内单元体流入与流出水量相等，推导出三维渗流基本方程式如下<sup>[15]</sup>：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (1-2)$$

式中， $k_x$ —— $x$ 方向渗透系数；

$k_y$ —— $y$ 方向渗透系数；

$k_z$ —— $z$ 方向渗透系数；

$Q$ ——边界流量；

$\Theta$ ——体积含水率；

$t$ ——时间。

该方程假定在任意位置、任意时刻微小体积的流入和流出的变化量与体积含水率的变化量相同，即  $x, y, z$  方向的流量变化与流量之和与体积含水率的变化相同，可认为是非稳定渗流的渗透方程。稳定渗流状态中流入和流出量随时间没有变化，所以公式右边为零：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = 0$$

渗流分析通常在假定总应力不变的情况下进行，孔隙大气压力是不变的，所以体积含水率的变化仅与孔隙水压变化相关。体积含水率的变化与孔隙水压变化的关系如下：

$$\partial \Theta = m_w \partial u_w \quad (1-3)$$

式中， $m_w$ ——阻尼系数。

重新整理式(1-1)，得

$$u_w = \gamma_w (H - z) \quad (1-4)$$

将式(1-4)代入式(1-3)，得

$$\partial \Theta = m_w \partial \gamma_w (H - z) \quad (1-5)$$

将式(1-5)代入式(1-2)，得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial (H - z)}{\partial t}$$

标高  $z$  对时间的导函数为零，则三维(非稳定渗流)渗流基本方程式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}$$

## ③ 饱和稳定渗流定解条件。

对于饱和稳定渗流，基本微分方程的定解条件仅为边界条件，常见类型如下。

第一类边界条件：

$$H(x, y, z) = \varphi(x, y, z) \big|_{(x, y, z) \in \Gamma_1}$$

式中， $\Gamma_1$ ——渗流区域边界；

$\varphi(x, y, z)$ ——已知函数， $x, y, z$  位于边界  $\Gamma_1$  上。

第二类边界条件:

$$\bar{k} \frac{\partial H}{\partial n} \bigg|_{\Gamma_2} = q(x, y, z) \big|_{(x, y, z) \in \Gamma_2}$$

式中,  $\Gamma_2$ ——给定流入流量边界段;

$q(x, y, z)$ ——已知函数;

$n$ —— $\Gamma_2$ 的外法线方向。

自由面边界条件:

$$\bar{k} \frac{\partial H}{\partial n} \bigg|_{\Gamma_3} = 0, H(x, y, z) \big|_{\Gamma_3} = z(x, y)$$

式中,  $\Gamma_3$ ——自由面边界。

溢出面边界条件:

$$\bar{k} \frac{\partial H}{\partial n} \bigg|_{\Gamma_4} \neq 0, H(x, y, z) \big|_{\Gamma_4} = z(x, y)$$

式中,  $\Gamma_4$ ——自由面边界。

④ 非饱和非稳定渗流定解条件方程。

非饱和非稳定渗流基本方程的定解条件方程如下。

初始条件:

$$H|_{t=0} = H_0(x, y, z, t)$$

水头边界条件:

$$H|_{\Gamma_1} = f_1(x, y, z, t)$$

流量边界条件:

$$k_n \frac{\partial H}{\partial n} \bigg|_{\Gamma_2} = f_2(x, y, z, t)$$

⑤ 渗流有限元基本方程。

采用伽辽金 (Galerkin) 加重余量 (Weighed Residual) 法对三维渗流基本方程进行空间离散, 推导得到有限元方程式:

$$\int_v ([B]^T [C] [B]) dV \{H\} + \int_v \lambda (\langle N \rangle^T \langle N \rangle) dV \{H\} \cdot t = q \int_A (\langle N \rangle^T) dA$$

式中,  $[B]$ ——动水坡降矩阵;

$[C]$ ——单位渗透系数矩阵;

$\{H\}$ ——节点水头矩阵;

$q$ ——单元边的单位重量;

$\lambda$ ——非稳定渗流的阻流项,  $\lambda = m_w \gamma_w$ ;

$\{H\} \cdot t = \frac{\partial H}{\partial t}$ ——随时间变换的水头。

将有限元方程用简化方式表现如下:

$$[K] \{H\} + [M] \{H\} \cdot t = \{Q\} \quad (1-6)$$

式中,  $[K]$ ——总体渗流矩阵,  $[K] = \int_v ([B]^T [C] [B]) dV$ ;

$[M]$ ——土体单元贮水系数矩阵,  $[M] = \int_v \lambda (\langle N \rangle^T \langle N \rangle) dV$ ;

$\{Q\}$ ——流量自由系数矩阵,  $\{Q\} = q \int_A (\langle N \rangle^T) dA$ 。