

内陆干旱区平原水库节水及 周边土壤盐渍化防治

侍克斌 严新军 陈亮亮 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内陆干旱区平原水库节水及 周边土壤盐渍化防治

侍克斌 严新军 陈亮亮 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书研究了内陆干旱区平原水库主要存在的三个问题：渗漏损失较严重，蒸发损失较大，周边土壤次生盐渍化。提出了在经济合理的基础上，既满足渗透稳定又尽量减少渗漏量的平原水库防渗结构设计计算方法；研究了防蒸发浮板的合理结构尺寸及在水库中的布置和连接方式，给出了其结构稳定和节水效率的计算方法；提出了预测水库周边土壤次生盐渍化范围的分析计算方法和防治措施；最后研究了防治水库周边土壤次生盐渍化的坝前防渗、化学改良、优化灌溉制度、坝后排水及综合措施。

本书可供水利工程及相关专业领域的设计、施工、管理、科研和教学人员使用与参考。

图书在版编目（C I P）数据

内陆干旱区平原水库节水及周边土壤盐渍化防治 /
侍克斌, 严新军, 陈亮亮著. — 北京：中国水利水电出版社, 2016. 3
ISBN 978-7-5170-4148-1

I. ①内… II. ①侍… ②严… ③陈… III. ①干旱区
—农田灌溉—节约用水—研究②干旱区—盐渍土改良—研
究 IV. ①S275.3②S156.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第040258号

书 名	内陆干旱区平原水库节水及周边土壤盐渍化防治
作 者	侍克斌 严新军 陈亮亮 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 13.25印张 314千字
版 次	2016年3月第1版 2016年3月第1次印刷
定 价	48.00元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究



内陆干旱区的平原水库主要存在三个方面的问题：其一是由于它们多坐落在冲积平原的牛轭湖、古河道和扇缘洼地上，坝线长、坝体防渗透及地基处理标准低，故水库渗漏损失较严重；其二是内陆干旱区降水量少，蒸发量大，加上平原水库的面积大，水深小，造成水库蒸发损失较大；其三是因为平原水库的渗漏量较大，再加上内陆干旱区的气候条件，造成水库周边地下水位上升，进而引起土壤次生盐渍化。

本书对以上三方面的问题进行了较为系统的研究。首先针对现行平原水库在防渗结构设计中注重渗透稳定而忽略减少渗流量的理念，提出了在经济合理的基础上，既满足渗透稳定又尽量减少渗漏量的平原水库防渗结构设计计算方法；另外根据内陆干旱区平原水库蒸发损失大于渗漏损失的特点，研发和引入了密度适宜、强度高、憎水、无毒、耐久性好的防蒸发节水浮板，研究了浮板的合理结构尺寸及在水库中的布置和连接方式，提出了防蒸发浮板结构稳定和节水效率的计算方法；再者对与土壤次生盐渍化密切相关的地下水临界水深进行了研究，提出了预测内陆干旱区平原水库周边土壤次生盐渍化范围的分析计算方法和防治措施；最后研究了防治内陆干旱区平原水库周边土壤次生盐渍化的坝前防渗工程措施、化学改良措施、优化灌溉制度措施、坝后排水工程措施及综合措施，分析了各种措施的改良效果及适用条件。

本书的研究工作得到新疆科技支撑计划项目“内陆干旱区平原水库防渗节水与周边环境改善关键技术研究”（201233132）、国家自然科学基金“内陆干旱区平原水库防渗节水与周边次生盐渍化影响研究”（50969010）、新疆水利水电工程重点学科基金的资助。

感谢“500”水库管理处、恰拉水库管理处、新疆水利水电勘测设计研究院和新疆生产建设兵团水电勘测设计院等提供的研究实践平台和大力支持！本书的撰写参阅并调研了这些水库的大量设计、施工、观测和运行资料，并参考了许多前人的研究文献。感谢白俊文、袁莹、李建华、尹海华、常卓强、徐毅、哈丽木热木、宋兴亮、张永山、张晓浩、谢晓勇、许骥、李存立、孙珍珍同学！他们参与了部分研究和资料整理工作。

由于作者水平有限，书中难免存在不适和错误之处，敬请读者批评指正。

作者

2015年11月1日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 内陆干旱区平原水库防渗节水的重要性	2
1.3 内陆干旱区平原水库防蒸发节水的必然性	3
1.4 内陆干旱区平原水库周边土壤次生盐渍化范围预测的必要性	4
1.5 内陆干旱区平原水库周边土壤次生盐渍化防治	4
第 2 章 平原水库防渗节水	6
2.1 无限深透水地基上带有防渗斜墙和水平铺盖的土石坝有限 元渗流计算	6
2.2 无限深透水地基上带有防渗斜墙和垂直防渗墙的土石坝 有限元渗流计算	12
第 3 章 平原水库上苯板及复合材料防蒸发节水试验	19
3.1 试验点基本情况	19
3.2 试验材料的选择	19
3.3 试验因素及试验方法的选择	20
3.4 水库现场试验	25
第 4 章 两端简支浮板的力学计算	28
4.1 计算模型的建立	28
4.2 计算波浪力	29
4.3 确定波浪要素	32
4.4 模型的受力计算	32
4.5 计算实例	34
第 5 章 一端固定浮板的力学计算	36
5.1 建立计算模型	36
5.2 计算风荷载	36
5.3 确定计算参数 α	38
5.4 模型的受力计算	38

5.5 计算实例	40
第 6 章 两边固定浮板的力学计算	42
6.1 建立计算模型	42
6.2 平板结构的基本方程	42
6.3 浮板的边界条件	44
6.4 差分法求解浮板的内力及反力	44
6.5 程序设计与说明	52
6.6 两边固定的浮板计算实例	55
第 7 章 平原水库上彩钢夹芯板与苯板复合隔墙板防蒸发节水试验	57
7.1 彩钢夹芯板防蒸发节水试验	57
7.2 苯板复合隔墙板防蒸发节水试验	62
第 8 章 平原水库上轻质加筋复合浮板研发及防蒸发节水试验	70
8.1 EPS 轻质混凝土试验研究	70
8.2 EPS 轻质混凝土加筋浮板及水库防蒸发节水试验	75
8.3 碳纤维布复合 EPS 轻质混凝土加筋浮板制备及水库现场防蒸发节水试验	79
第 9 章 平原水库上塑料空心板防蒸发节水试验	84
9.1 试验材料选择及现场试验	84
9.2 试验水库水面蒸发量计算	89
9.3 塑料空心浮板抑制水面蒸发量计算及效果分析	102
9.4 不同面积的塑料空心板防蒸发节水效率分析	107
第 10 章 平原水库上 PVC 泡沫浮板防蒸发节水试验	113
10.1 PVC 泡沫浮板在水库防蒸发中的节水效率试验	113
10.2 不同面积 PVC 泡沫浮板覆盖下干旱区水库防蒸发节水效率分析	124
第 11 章 干旱区平原水库渗流计算、周边土壤盐渍化预测分析及防治技术	129
11.1 平原水库渗流计算及对下游地下水位影响的有限元分析	130
11.2 平原水库渗漏引起的下游土壤盐渍化预测分析	138
11.3 防治平原水库周边土壤次生盐渍化的措施	148
11.4 本章总结	154
第 12 章 膜下滴灌棉田盐碱土壤的化学改良	155
12.1 典型试验区土壤水盐调控	155
12.2 典型试验区土壤化学改良方法	165
12.3 典型试验区土壤水盐调控化学改良剂适应性分析	171
第 13 章 用优化灌溉制度的方法改良棉田盐碱土壤	179
13.1 引言	179
13.2 棉花累加耗水量的计算方法	179

13.3 对不同土质棉花一定根系深度的储存水量的研究 180

13.4 棉花优化灌溉制度制定 181

13.5 结语 182

第 14 章 排盐节水条件下的次生盐碱地综合治理技术 184

14.1 恰拉水库下游试验区耕地水盐运移规律研究 184

14.2 节水灌区结合农田排水措施改善土壤次生盐渍化 194

参考文献 198

第 1 章

绪 论

1.1 引言

全世界有相当一部分区域都属于内陆干旱区,在我国也是如此。这些区域的基本特征是年降水量小,年蒸发量大,农业生产主要靠人工灌溉。例如在我国大西北占 1/6 国土的新疆,大部分地区的年降水量都不足 200mm,但年蒸发量却在 2000~3000mm。因此,高效用水和节约用水是该区域可持续发展的核心和关键。

为了满足日益扩大的人工绿洲的用水需求和保护天然绿洲的生态环境,全世界各国都采取了各种形式的节水方式。在田间节水方面,采用标准化沟畦灌、膜上灌、喷灌、微灌、膜下滴灌和化学、生物节水技术。在输水渠系节水方面,采用不同形式的防渗明渠、暗渠和管道输水技术。但在水库节水方面,相应的研究和工程应用还比较少。

实际上,在干旱区域有许多平原水库,它们多坐落在冲积平原的牛轭湖、古河道和扇缘洼地上,其特点是面积大、水深小、坝线长、地基处理标准低。例如在新疆已建的 466 座水库中,绝大多数都为平原水库,它们大多数坐落在粉砂土、砂壤土、壤土或黏土等深厚地基上,并用这些土料筑坝。这些水库的总库容约为 59.3 亿 m^3 ,水库水面面积约 2000 km^2 ,平均水深为 2.97m,根据已有研究成果估算,新疆水库的年蒸发量为 26.1 亿 m^3 ,年渗漏量为 8 亿 m^3 ,合计每年损失水量约 34.1 亿 m^3 。

平原水库不仅浪费了大量宝贵的水资源,而且抬高了库区周边地区,尤其是下游灌区的地下水位,增加了无效蒸发,使盐聚集在土壤表面,造成土壤次生盐渍化,严重危及农业生产,同时,也使生态环境进一步恶化。

需要指出的是,平原水库具有单方水造价低且距灌区近、输水方便的优点,近期内完全用山区性水库替代是不太可能的,因此,完善这些水库的功能并克服它的缺点是值得研究的课题。本书的研究首先是根据平原水库多坐落在无限深和半无限深软基上的特点,寻找尽量减少坝体、坝基和全库盘渗漏量且经济合理的防护措施,以及相应的渗流控制计算方法,研究防止水库水面蒸发损失的措施,以达到水库防渗和防蒸发节水的目的。同时,在前面研究成果的基础上,进一步研究平原水库由于渗漏造成周边土壤次生盐渍化范围的预测方法。再者,由于水库防渗节水所采取的措施不同,造成库区周边地下水的水位也不同,因此,有必要研究平原水库在不同防渗措施下水库周边地区土壤水、地下水水盐的演化规律,再根据这些规律,找出水库周边地区土地改良、生态环境恢复以及防治土壤次生

盐渍化的方法和对策。

1.2 内陆干旱区平原水库防渗节水的重要性

由上节可知,内陆干旱区平原水库水的有效利用率约为40%~45%,换句话说,每年注入平原水库的水量有55%~60%在库内就渗漏和蒸发损失了,其中渗漏的水量约占总损失量的25%。

内陆干旱区的平原水库大多数都坐落在无限深透水地基上。由于透水层较深,坝体又比较低,设计中许多水库应该按照无限深透水地基考虑,但是由于无限深透水地基的渗流控制理论尚不完善,大多数水库按照有限深透水地基的理论来设计,结果导致了防渗体的防渗效果不佳,渗流量过大,由此引发许多其他的问题。其中,土壤的次生盐渍化就是由此造成的主要危害之一。

平原水库建成后,随着库水位的上升,库周地下水位也跟着上升,导致水库周围浸没、湿陷、沼泽化、盐渍化等现象的产生。尤其是有的水库接近耕地,水库造成的危害就更大,甚至造成耕地的荒漠化。例如:新疆的柳沟水库、奎屯水库、车排子水库周围的柳沟灌区,由于地下水位上升,盐分积聚地表,使土壤的盐碱化速度加快,造成灌区有近万公顷的土地被荒弃(图1.1)。已利用耕地中,土壤的盐分含量平均在0.39%左右,也存在不同程度的土壤盐渍化,造成农作物缺苗、断垄、产量不高,严重制约着农业生产的发展。又如:农八师蘑菇湖水库建前地下水埋深大于3m,现为0.2~0.85m;跃进水库则由5m上升为1~1.5m,引起坝下游地区地面湿软,土壤盐渍化。蘑菇湖水库东北地表0.05m为硬盐碱壳,其下为0.10m厚的疏松土和盐混合层,含盐量1.2%~3.2%,土壤盐渍化严重。农八师安集海一库坝后坡脚处地面沼泽化,并有流土涌砂现象,农二师卡拉水库坝后渗漏积水严重;农七师柳沟水库在高水位运行时,坝后积水较深,道路翻浆严重;阿克苏西大桥水电站调节水库曾出现库周耕地潜水位高于地表,此类现象在平原水库中带有普遍性。

由此可见,研究内陆干旱区平原水库防渗节水不仅对进一步提高水库的有效利用率,而且对于减少库区周边土壤的土壤次生盐渍化都有十分重要的意义。

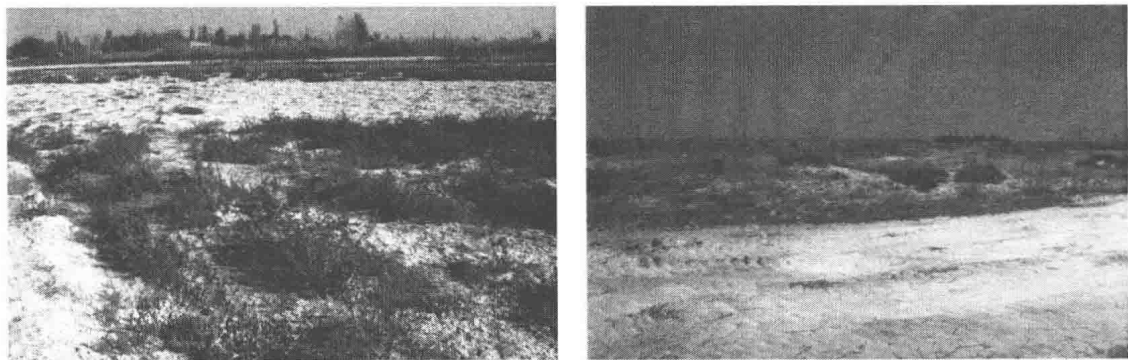


图1.1 某平原水库下游土壤盐渍化现状

1.3 内陆干旱区平原水库防蒸发节水的必然性

由前两节可知,在内陆干旱区,每年注入平原水库的水量有 55%~60% 在库内都渗漏和蒸发损失了,其中蒸发的水量约占总损失量的 75%。

节水是内陆干旱区永恒的研究主题,有无限的市场前景,由于目前田间节水已发展到膜下滴灌、输水系统节水已发展到管道输水,因此,今后的节水目标会很自然地移向水源——水库,而平原水库防蒸发节水必将逐渐变成重点。

2015 年 8 月,美国加州将 9600 万个黑色的塑料球滚入 70 万 m^2 的水库中用于防蒸发节水抗旱(图 1.2),漂浮的塑料球直径约 10cm,每个塑料球的成本是 36 美分。覆盖这种塑料球是为了有效地减少水源蒸发(图 1.3),根据计算,采取这一措施每年可以减少约 113 万 m^3 的水量被蒸发掉,即每覆盖 1m^2 每年可节水约 1.61m^3 。图 1.4 是黑色塑料球覆盖整个水库水面的情景,球黑色的外壳能让它抵御紫外线的照射,从而增强耐久性。



图 1.2 施工人员在水库大坝上游坡将塑料球投放滚入水库

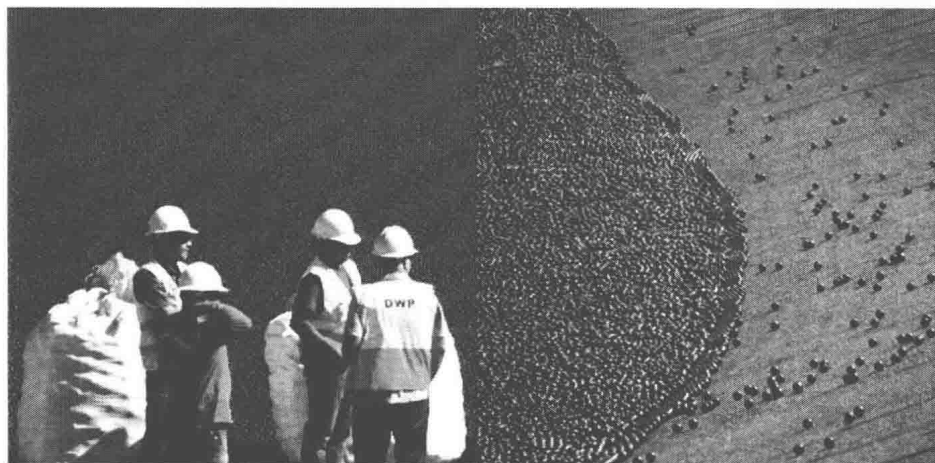


图 1.3 塑料球从水库上游坝坡滚入水库和覆盖水面的情景

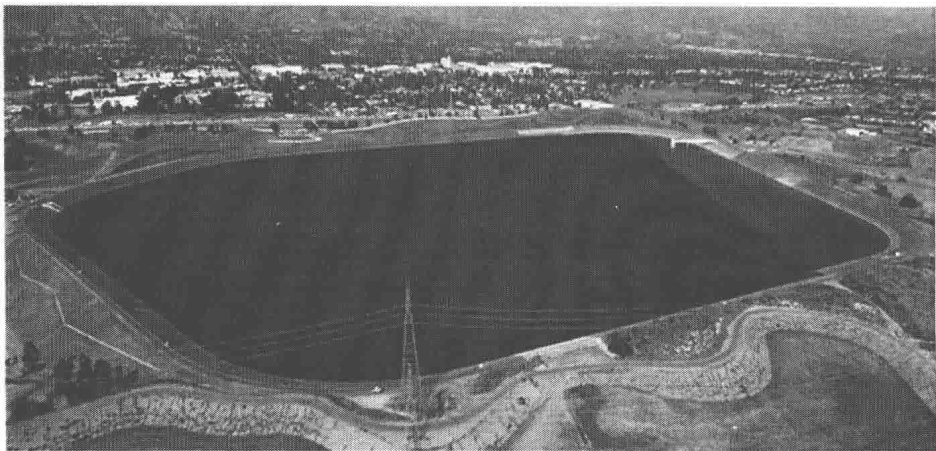


图 1.4 黑色塑料球覆盖整个水库水面的情景

1.4 内陆干旱区平原水库周边土壤次生盐渍化范围预测的必要性

根据前述分析，内陆干旱区平原水库周围土壤次生盐渍化的主要原因是：水库渗流量过大导致地下水位升高“临界深度”以上（地下水“临界深度”是指在蒸发最强烈季节，土壤表层不显积盐的最浅地下水埋藏深度），土壤和地下水的盐分通过土壤毛细管作用，向地表剧烈蒸发积盐的结果。尤其是在我国西北的新疆地区，气候干燥、多风且日照时间较长，形成强蒸发条件，地下水位一经升高后，即使地下水的矿化度不高，地表积盐的速度仍是惊人的。所以平原水库要防治下游土壤发生次生盐渍化的关键在于将地下水位控制在“临界深度”以下。

综上所述，有必要研究内陆干旱区平原水库由于渗漏造成周边土壤次生盐渍化范围的预测方法。具体思路是：

- （1）研究平原水库渗漏对周边地下水埋深的影响规律。将平原水库大坝坝体、坝基与下游土壤当做一个整体，以渗流计算的有限元法为基础，利用 ABAQUS 软件进行数值模拟计算，直观地模拟大坝坝体、坝基和下游地下的浸润面位置，计算水库下游地下水埋藏深度，对比水库监测系统的观测数据，验证有限元数值计算所得地下水埋深的可靠性，并预测水库自蓄水后至设计运行期结束期间下游的地下水水位。
- （2）探究平原水库周边地下水生态环境现状。分析影响地下水临界深度的因素，得出适用于本书所研究水库周边的地下水临界深度，结合之前所计算的地下水水位，预测水库下游出现土壤盐渍化现象的范围及水库渗漏所能影响地下水的最大范围。
- （3）分析恰拉水库改建前后坝后地下水位及盐渍化范围，探讨改善水库的防渗体系这一工程措施对防治平原水库周边土壤盐渍化的效果。

1.5 内陆干旱区平原水库周边土壤次生盐渍化防治

在内陆干旱区平原水库周边，由于水库渗漏引起地下水位上升，会造成土壤次生盐渍

化，尤其是随着膜下滴灌技术的大力推广使用，灌排模式的改变，从而导致了更大范围的土壤次生盐渍化问题。例如在新疆，就有 1/3 的耕地出现了土壤次生盐碱化现象，盐渍化程度已经严重威胁到灌区的生态安全以及农业可持续发展，因此，必须加强盐碱地防治的研究。

对于内陆干旱区的平原水库，尤其是大型平原水库周边的土壤次生盐渍化，目前还没有一套系统且有效的防治措施，究其原因，是由于各平原水库的特点（防渗措施、地质环境、地下水等）不同。根据多年来各大平原水库的治理经验，防治平原水库下游土壤次生盐渍化的措施主要包括以下几类：工程措施、生物措施、化学措施、排水措施和管理制度措施。本书的后部分主要研究了防治平原水库下游土壤次生盐渍化的工程措施、化学措施、排水措施和管理制度措施。

第 2 章

平原水库防渗节水

以往对平原水库的防渗设计，主要是依据山区性水库的设计准则，以满足渗透稳定为主。对深厚透水坝基的防渗设计，水平铺盖一般取 5~8 倍的坝前水头，垂直防渗墙一般取 2~4 倍的坝前水头，并根据坝地质条件和防渗结构形式进行相应的渗透稳定计算复核确定。但按上述理念设计平原水库，还不能有效地解决水库渗漏量较大和由此引起的水库周边土壤次生盐渍化问题。当然，要想较好地解决平原水库渗漏量的问题，最好的办法是做全库盘防渗，而土工膜防渗体结构的应用与推广，已为解决这一问题创造了条件，但多数平原水库在除险加固和新建设计中，因为工程投资或设计理念的影响放弃了全库盘防渗机会。本章介绍几种在满足渗透稳定的前提下，既能兼顾工程投资，又能最大限度节省平原水库渗漏量的设计计算方法。

2.1 无限深透水地基上带有防渗斜墙和水平铺盖的土石坝有限元渗流计算

在渗透系数各项异性的深厚覆盖层或非均质无限深透水地基上，存在着很多限制条件和技术难度。而且在实际工程中，水平防渗体无论是利用黏土还是土工膜，都会因为人为因素，或不可抗力等原因而存在渗漏的问题。因此，本节对非均质无限深地基上带有不同长度的微透水水平铺盖和斜墙防渗体的土石坝，进行了有限元渗流分析计算，并得出以下结论：当铺盖长度是坝前水深的 8 倍时，土石坝坝后渗透坡降小于 0.1，满足渗透稳定的要求；当铺盖长度是坝前水深的 26~30 倍时，土石坝坝体、坝基渗流量基本趋于稳定，此时若再通过增加铺盖长度的方法减少渗流量，其效果已经不明显；当水平铺盖长度是坝前水深 30 倍时，比规范规定 5~8 倍水头的设计节水 35%~42%。

静力有限元法一般可以用来处理土石坝非均值无限深透水地基上关于渗流的问题。这种方法是通过综合考虑上游水头、外部静荷载等因素的影响，从而分析坝体有关渗透量和渗透特性方面的问题。

2.1.1 有限元法概述及在渗流问题中的应用

有限元法是伴随着计算机技术的发展而形成的一种数值分析方法，它是应用数学、力学以及计算机技术相结合的产物。有限元法的基本思想是：将连续的求解域离散为一组单元的组合体，用在每个单元内假设的近似函数来分片地表示求解域上待求的未知场函数，近似函数通常由未知场函数及其导数在单元各节点的数值插值函数来表达。从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。

作为一种离散化的数值解法,有限单元法首先在结构分析,然后又在其他领域中得到广泛应用。离散化的思想可以追溯到20世纪40年代,1941年A. Hrennikoff首次提出用构架方法求解弹性力学问题,当时称为离散元素法,仅限于用杆系结构来构造离散模型。如果原结构是杆系,这种方法是精确方法,发展到现在就是大家所熟知的结构分析的矩阵方法,究其实质这还不能够说是有限单元法的思想。1943年Rcourant在求解扭转问题时为了表征翘曲函数而将截面分成若干三角形区域,在各三角形区域设定一个线性的翘曲函数,这是对里兹法的推广,实质上就是有限单元法的基本思想,这一思想真正用于工程中是在电子计算机出现后。20世纪50年代,由于航空业的需求,波音公司的专家第一次用三个结点的三角形单元,把矩阵位移法用在一个平面的问题上。与此同时,联邦德国斯图加特大学的J. H. Argyris教授发表了一些能量原理与矩阵分析的论文,这种方法对理论基础研究作出了杰出的贡献。1960年美国的R. W. Clough教授首次在一篇题为“平面应力分析的有限单元法”的论文中提到有限单元法(The Finite Element Method)一词,后来这一名称得到广泛承认。20世纪60年代,随着有限元方法的迅速发展,除了力学学者,许多数学家也参与了这项工作,奠定了有限元方法的理论基础,找出有限元法和变分法之间的关系,开发出了许多的单元模式,使有限单元法的应用范围得到扩大。20世纪70年代之后,有限元法进一步迅速发展,其应用范围扩展到工程的各个领域,成为连续介质问题的数值解法中最常用的分支,由变分法有限元扩展到加权残值法和能量平衡法有限元,从弹性力学的平面问题扩展到空间问题、板壳问题,从静态平衡问题扩展到稳定问题,动力问题及波动问题,从线性扩展到非线性问题,研究分析的对象由原来的弹性材料扩展至塑性、黏弹性、黏塑性及复合材料,研究目标由单纯的结构分析扩展到结构优化甚至设计自动化,研究领域由固体力学领域扩展到流体力学、传热学、电磁学等领域。伴随着计算机的发展,有限元法中的繁琐的计算过程逐渐由人工计算转为计算机代替计算,这大大节省了人力和时间,科技人员又将计算机技术、数学理论与有限元理论相结合,开发出许多有限元通用软件,常见的有限元软件有ANSYS、ADINA、ABAQUS及NASTRAN等。

关于有限元法的基本原理,简单而言,有限元法研究就是将连续体离散化为有限个单元的集合体来进行的。通过变分原理建立模型,推导出近似解的一组方程,最终转化为求解多阶系数矩阵的线性方程组。这类计算主要利用计算机进行。

对于渗流计算,由于无压渗流具有渗流自由面(浸润线),且非稳定渗流自由面随着上游库水位升降而变动,而且一般的渗流场都有不同程度的非均质和各向异性,几何形状和边界条件较复杂,求解解析解在数学上存在着不少困难,仅仅能对一些简单的流动情况获得解析解。20世纪60年代后,电子计算机的普及和数值计算方法的发展,特别是有限元法提出后,推进了渗流数学模型的发展。有限元法能系统地编成计算程序,很方便地处理复杂的边界条件,非均质土层,以及第二类流量边界不需专门处理而能自动满足,故目前在渗流计算中得到广泛的应用。

用有限元法求解渗流问题,一般有以下几个步骤:

(1) 连续区域离散化。将需要研究的渗流区域分解成若干相互连接的单元,单元的划分以计算机性能和精度要求为基础。

- (2) 插值函数的选择。单元内的水头分布采用一些简单而适用的函数表示。
- (3) 推导特性矩阵方程。

(4) 组合各个单元的渗透矩阵集合形成整个渗流区域的总体渗透矩阵 $[K]$ ，其代数方程的形式为

$$[K]\{H\}=\{F\} \tag{2.1}$$

式中 $\{H\}$ ——渗透区各节点水头值的列向量；即

$$\{H\}=[H_1,H_2,\cdots,H_n]^T \tag{2.2}$$

式中 n ——内节点和第二类边界条件上的节点数（即未知节点数）；

$\{F\}$ ——自由项（已知项）组成的列向量。即

$$\{F\}=[F_1,F_2,\cdots,F_n]^T \tag{2.3}$$

- (5) 代数方程组的求解。利用消元法和迭代法求解各个节点的未知水头值。
- (6) 由节点水头值计算水力比降、渗流量以及其他需要计算的物理量。

2.1.2 数值模型建立

某水库为灌注式平原水库，坝基为渗透系数不同的深厚粉细砂覆盖层，渗流设计按照无限深透水地基考虑。坝前最大水深为 8m，坝基 70m 之上和 100m 之下为较强透水层，渗透系数 k_1 为 $6.26\times10^{-3}\text{cm/s}$ ；70~100m 为较弱透水层，渗透系数 k_2 为 $2.50\times10^{-4}\text{cm/s}$ ，允许渗透坡降为 0.1。水库的坝体为土石坝，坝高为 12m，坝顶宽度为 6m，坝底最大宽度 54m，上下游边坡比均为 1：2，采用复合土工膜防渗结构作为水平防渗体和斜墙防渗体，坝后地下水位与地面同高。

以水平防渗体长度为 32 倍水头为例，建立非均质无限深透水地基微透水水平铺盖的有限元计算模型。坝基为长方体（800m×100m×224m），上游坝脚至上游边界 600m，下游坝脚至下游边界 146m。坝基 70m 之上为第Ⅰ层，100~224m 之下为第Ⅲ层，渗透系数 k_1 为 $6.26\times10^{-3}\text{cm/s}$ ；70~100m 为第Ⅱ层，渗透系数 k_2 为 $2.50\times10^{-4}\text{cm/s}$ ；考虑到施工时人为破坏的影响，水平防渗体和斜墙防渗体的渗透系数 k_3 取 $1\times10^{-7}\text{cm/s}$ ，具体渗透系数和密度见表 2.1。

表 2.1 坝体和坝基的参数

材料区域	$k/(\text{cm/s})$	$\rho/(\text{kg/m}^3)$
坝体	5.20×10^{-4}	1980
第一层	6.26×10^{-3}	1930
第二层	2.50×10^{-4}	1780
第三层	6.26×10^{-3}	1930
防渗体	1.0×10^{-7}	700

由于初次对该问题进行研究，且该模型参数在 X、Y 方向上是均匀的，因此只对模型进行了二维的分析。对全局每 5m 进行一个单元的划分。坝体和坝基共有 7330 个节点，7239 个四面单元体。模型的建立及单元剖分如图 2.1 所示。

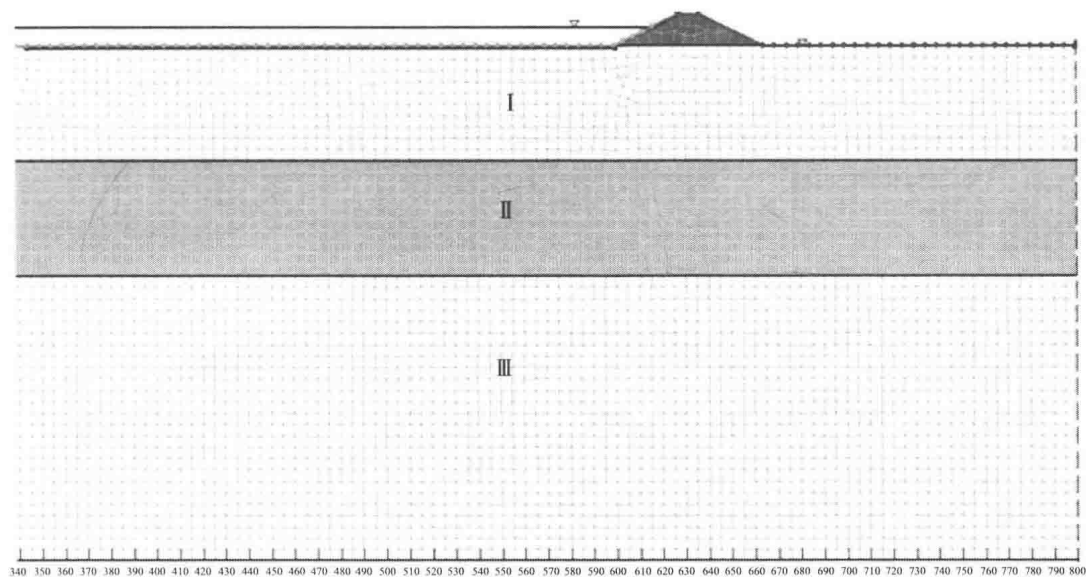


图 2.1 土石坝的网格剖分图

该模型分析中一共分析了 16 种工况，分别是水平铺盖的长度是坝前水头的 2~32 倍（代表铺盖长度分别为 16m、32m、48m、64m、80m、96m、112m、128m、144m、160m、176m、192m、208m、224m、240m、256m）的工况。

2.1.3 计算结果与分析

此计算设定在稳定渗流的条件下，不同铺盖长度计算终止时的情况。以水平铺盖长度为 32 倍坝前水头为例的孔隙水压力等值线云图、坝体浸润线图、总水头等值图、流速分布云图分别如图 2.2~图 2.5 所示。

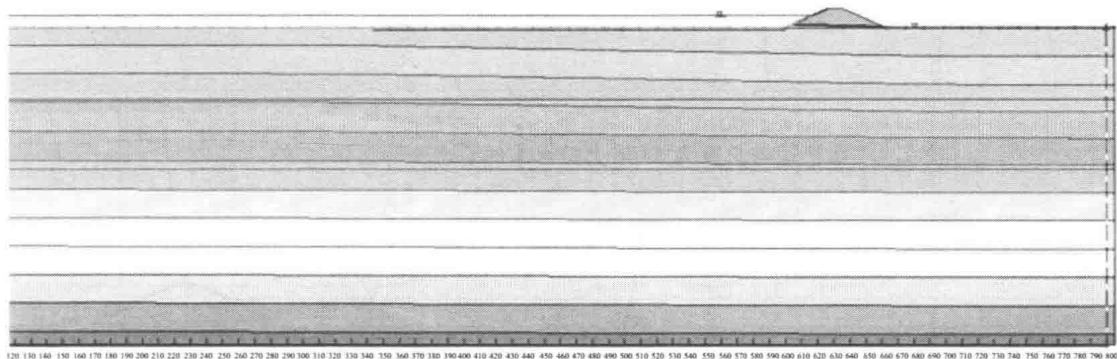


图 2.2 水平铺盖长度为 32 倍上游水头计算终止时的孔隙水压力等值云线图（单位：kPa）

由图 2.2 和图 2.3 可以看出，在坝体的水平面以上的部分均存在大小不同的负孔压区。意味着该区域是非饱和的，而孔压为零的位置即为浸润线（面）。

由图 2.6 可以看出，当假设水平防渗体和斜墙防渗体的渗透系数在人为破坏的情况

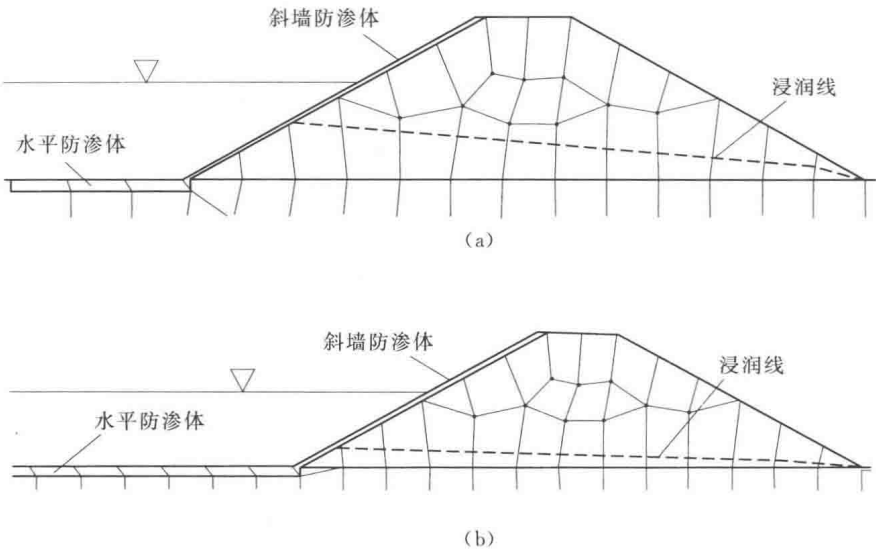


图 2.3 坝体浸润线图

- (a) 水平铺盖长度为 2 倍上游水头计算终止时的浸润线图；
(b) 水平铺盖长度为 32 倍上游水头计算终止时的浸润线图

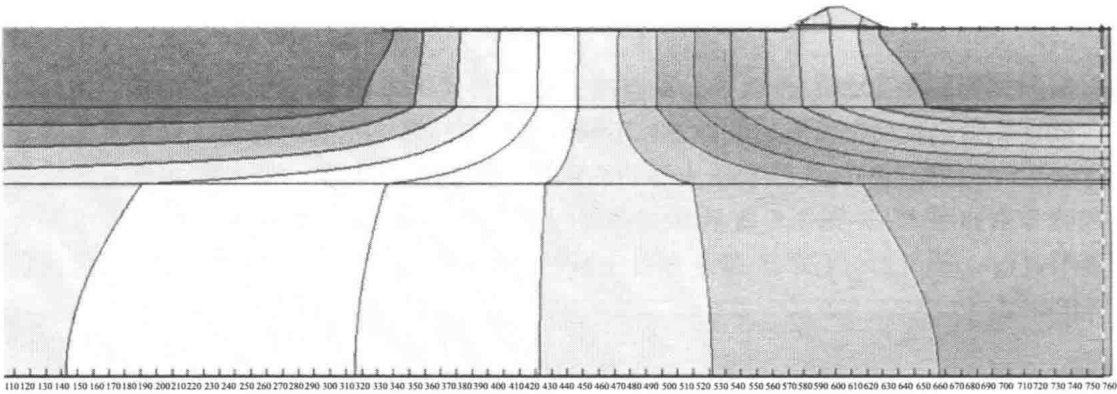


图 2.4 水平铺盖长度为 32 倍上游水头的总水头等值图 (单位: kPa)

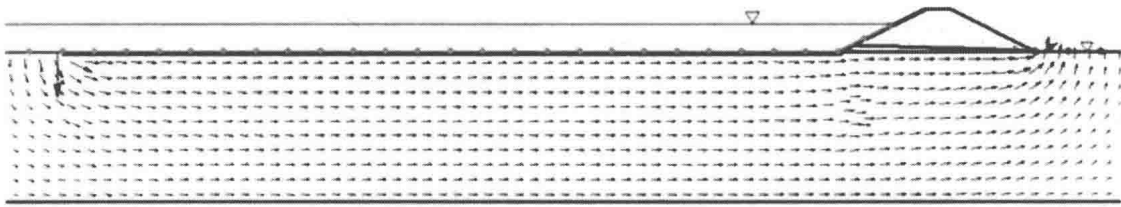


图 2.5 水平铺盖长度为 32 倍上游水头的流速云线图 (单位: m/s)