

堤坝及其施工

关键技术研究与实践

杨光煦 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

堤坝及其施工关键技术 研究 与 实践

杨光煦 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本专著为作者从事防洪工程、堤坝结构及地基处理、水利工程关键施工技术设计与研究工作成果,按 26 个专题叙述。内容涉及:防洪规划,堤防结构、险情及其处置,动水中直接建混凝土坝、围堰,面板堆石坝、粉煤灰坝设计,砾质土筑坝,砂砾地基与软土地基处理,深水填筑及截流,岩塞、岩坎和保护层一次爆破,水下灌注沥青混凝土,混凝土坝冷却及接缝灌浆经验。

图书在版编目(CIP)数据

堤坝及其施工关键技术研究与实践/杨光煦著. —北京:中国水利水电出版社, 2000.12

ISBN 7-5084-0497-1

I. 堤… II. 杨… III. 挡水坝-工程施工-研究 IV. TV64

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 56676 号

书 名	堤坝及其施工关键技术研究与实践
作 者	杨光煦 著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:sale@waterpub.com.cn 电话:(010)63202266(总机)、68331835(发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	国土资源部河北地勘局测绘院印刷厂
印 刷	国土资源部河北地勘局测绘院印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 442 千字
版 次	2000 年 12 月第一版 2000 年 12 月北京第一次印刷
印 数	0001-4050 册
定 价	39.00 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

前 言

笔者参加工作 38 年中,有幸参加长江三峡、葛洲坝、汉水丹江口、赣江万安等水利枢纽,贵州乌江渡、重庆江口等水电站,深圳河治理,黄河禹门口供水工程,深圳国际机场、珠海机场、青山热电厂粉煤灰堤、武汉展览馆深基坑支护等工程建设,以及 1998 年抗洪抢险和汛后长江堤防建设,从事堤坝结构与施工关键技术的设计及研究工作。还应邀参与广东北江飞来峡、四川紫坪铺、湖南五强溪等水利枢纽、白云面板堆石坝、上海浦东国际机场、浙江瑞安海堤、珠海直升飞机场海堤加固、镇江—扬州长江大桥(润扬长江大桥)等工程设计咨询工作。

笔者在从事上述工程的咨询、设计与研究工作中,取得一些解决建设工程关键技术的研究成果和实践经验。将其中有关堤坝及其地基部分成果整理、归纳成《堤坝及其施工关键技术研究与实践》专著。从工程实际需要及技术发展创新要求出发,以解决堤坝工程中关键技术为目的,提出在堤坝结构及施工中普遍关心和亟待解决的关键技术问题的实用理论分析、计算方法和工程技术措施。

每个人的经历和所处环境不同,从事工作各异。笔者认为,有几十年工作经验、特别是长期在科学研究、设计、施工第一线的科技工作者,把工作中遇到的关键技术问题及其解决措施、效果,包括成功经验、失败教训总结出来,奉献社会,在知识经济新时代,是件非常有益于我国社会主义建设和科技事业发展的事情。

本书分三篇共 26 章阐述。

第一篇 防洪及堤防工程

河流是构成人类生存环境的重要组成部分。河流两岸自古以来就是人类繁衍生息的场所。随着国民经济发展和人口增长,保护河流两岸人民免遭洪水灾害、生命财产安全和土地资源,愈加具有重要意义。防洪与堤防工程也日益成为我国工程界备受关注的问题。

堤防是城镇防洪的安全屏障。堤身及挡水水头一般不高,挡水时间短,往往为分期加高、加固,造成堤身填料及结构复杂,不论是结构、防渗与渗流控制,还是施工都有不同于土石坝的特殊要求。本篇从总结笔者参加抗洪抢险、急流堵口及堤防建设经验入手,从堤防结构、施工技术、险情处置及堵口技术四个方面,重点介绍堤防渗流控制原则与措施、在淤泥及淤泥质软土地基上建造堤防和穿堤建筑物的特殊结构与施工措施、土工合成材料(重点介绍土工网格)在堤防工程中的应用原理与方法、堤防险情原因及应急处理、河堤决口的水力特性及堵口结构。1998

年8月7日九江市长江大堤溃口,在超历史最高洪水位情况下,仅5天堵口成功,为我国截流与堵口技术发展,提供了极其宝贵的理论与实践经验。

第二篇 堤坝结构及地基处理

堤坝承担挡水、蓄水和泄水任务,对自身及其地基的稳定、承压、防渗、抗冲等性能都有特殊要求。

本篇主要介绍笔者在动水中直接建造溢流式混凝土拱围堰、高边坡处理、混凝土面板堆石坝、高土石坝防渗体、粉煤灰筑坝,以及地基处理中的研究成果及实践经验。内容有:三峡水利枢纽主要岩土工程问题及工程措施;动水中建坝的水下施工结构;面板堆石坝的混凝土面板滑动运动及其设计和合理温度控制措施、接缝形式;粉煤灰筑坝及其地基的渗流控制与结构措施;采用砾质土或风化料软岩填筑防渗体的设计与施工经验;粉细砂地基的开挖、填筑与处理方法;砂砾地基防渗措施及防渗工程布置;软土地基研究及处理技术。

第三篇 关键施工技术

堤坝施工多在河道、湖泊、沿海等水域或岸边进行。常需充分利用枯水期施工,进行施工导流、截流及水下作业。有很强的季节性,要求一定施工强度,比一般工民建、市政工程施工更为复杂,规模也更为宏大,具有强烈的实践性、复杂性、多样性、风险性和不连续性特点。随着水工技术发展,对堤坝施工提出更高要求;而新的施工技术和机具出现与发展,尤其是一些关键施工技术的突破,又进一步促进水工技术的发展。长江三峡水利枢纽及大规模堤防工程顺利建设,标志着我国堤坝施工技术已处于世界领先水平。

本篇主要介绍笔者在气液双相流的工程应用(水下爆破防震、防冰、防浪及水下清基);导流明渠施工通航水力学计算方法及其工程技术措施;水中抛投(重点为深水抛投)填筑体稳定分析、不同填料的端进抛投技术;立堵三大截流类型(高流速型、深水低流速型及混合型)的堤头稳定机理及确保截流成功的关键技术措施;防渗墙造孔稳定性及施工控制指标计算;基岩保护层一次爆破、水下岩塞与岩埂爆破;水下及泥浆中灌筑沥青砂浆(或沥青混凝土)的方法和计算;混凝土坝后期冷却及接缝灌浆控制等方面的研究成果与实践经验。

本专著出版得到中国水利水电出版社、长江水利委员会长江勘测规划设计研究院的专家、领导,以及李念宣高级工程师等同志的热情关心与支持。焦宏彬、彭志豪同志认真编辑,提出许多宝贵意见,付出了艰辛劳动,使本专著能在较短时间内与读者见面。在此向他们表示诚恳谢意。

由于写作历史过程的局限和笔者水平有限,书中缺点和错误,敬请批评、指正。

杨光煦

2000年10月于武汉

目 录

前 言

第一篇 防洪及堤防工程

第一章	长江流域综合利用规划成就与经验	3
第二章	堤防渗流控制特点及其设计	5
第三章	软土地基上的堤防及穿堤建筑物	13
第四章	1998 年长江抗洪抢险及土工合成材料在防洪工程中的应用	29
第五章	土工网格与土体的界面效应及其在堤防与路堤工程中的应用	36
第六章	堤防险情及其处置	56
第七章	河堤决口水力特性及堵口技术	63
第八章	九江长江江堤堵口实录及经验	74

第二篇 堤坝结构及地基处理

第一章	三峡水利枢纽及其主要岩土工程问题	83
第二章	在流水中直接建造乌江渡溢流式混凝土拱围堰的水下施工及结构设计	89
第三章	面板堆石坝的混凝土面板滑移运动及接缝型式	104
第四章	粉煤灰坝及其地基的渗流控制与结构措施	112
第五章	砾质土与风化料软岩开挖料的防渗性能及其应用	125
第六章	粉细砂特性及其工程措施	143
第七章	砂砾地基防渗方案及防渗工程布置	160
第八章	我国天然软土地基研究及软基处理技术	182

第三篇 关键施工技术

第一章	气液两相流及其在水利与港口工程中的应用	189
第二章	导流明渠施工通航水力学计算与设计	199
第三章	水中抛投填筑研究	211
第四章	两次长江截流实践及截流理论新探讨	222
第五章	防渗墙造孔稳定性及施工控制指标计算	231
第六章	基岩保护层一次爆破机理及工程措施	242
第七章	水下岩塞爆破与岩埂爆破	248
第八章	水下及泥浆中灌筑沥青砂浆(或沥青混凝土)的方法和计算	272
第九章	丹江口大坝后期冷却经验	286
第十章	从丹江口大坝原型观测探讨接缝灌浆控制的几个问题	295
参考文献		302

第一篇 防洪及堤防工程

第一章 长江流域综合利用规划成就与经验

长江是中国第一大河,河流长度仅次于尼罗河与亚马逊河,入海水量仅次于亚马逊河与刚果河,均居世界第三位。干、支流流经 18 个省市。干流长 6300km,流域面积 180.7 万 km^2 ,属亚热带季风气候区;雨量丰沛,多年平均降雨量约 1100mm,多年平均入海水量 9600 亿 m^3 ,占中国大陆径流总量的 36%。干支流水能资源蕴藏量约 2.68 亿 kW,其中可能开发 1.97 亿 kW,年发电量 10000 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,约占全国水能资源的 50% 以上。长江流域也是我国最发达的地区之一。流域内人口占全国 35%,农业总产值占全国 36%、工业总产值占全国 40% 左右。干支流航道里程共约 7 万 km,占全国内河通航里程 70%。

长江流域的主要自然灾害是洪、涝、旱灾。洪灾的范围广,以中下游平原最为集中、频繁、严重;涝灾主要发生在平原地势低洼地区,沿江平原往往先涝后洪加重了灾害;旱灾主要发生在西南及中下游一些丘陵地区。

一、长江治理开发规划原则

按照全面规划,统筹兼顾,综合治理,综合利用;大型为骨干,大中小相结合,近期和远景相结合的基本原则,治理开发长江。水利规划准则为:

(1)开发利用水资源,应当服从防洪的总体安排,实行兴利与除害相结合的原则,兼顾上下游,左右岸和地区之间的利益,充分发挥水资源的综合效益。

(2)开发利用水资源,首先满足城乡居民生活用水,统筹兼顾农业、工业用水和航运需要。水资源不足时,应限制城市发展规模和耗水量大的工业、农业发展。

(3)各地区应根据水土资源条件,发展灌溉、排水和水土保持事业。在容易发生盐碱化和渍害地区,应控制和降低地下水位。

(4)在水能丰富的河流,有计划地进行多目标梯级开发。

(5)对流域范围内的水土流失、盐碱化、沼泽化、生态环境等问题,提出相应治理措施。

在防洪治理与规划工作中,遵循“蓄泄兼筹,以泄为主”和“江湖两利”的治理方针。根据长江洪水和水道情况,长江防洪应采取综合措施,逐步建成以堤防为基础,三峡工程为骨干,干支流水库、蓄滞洪区、河道整区相配套,结合封山植树、退耕还林、平垸行洪、退田还湖、水土保持等措施,以及其他非工程防洪措施构成的综合防洪体系。即采用“上蓄下疏”、“标本兼治”方法,逐步解决水患。治理长江中下游洪水的原则,以蓄滞洪区及部分水库拦蓄,并适当抬高堤防的防御标准以加大河道泄量。对于长江全流域,以上游建库拦洪,下游江湖疏浚扩大调蓄及泄量为目标,结合蓄滞洪区安全区建设及堤防加培。

要充分利用河道能力尽量宣泄洪水;有条件地区,考虑在上游修建水库,削减洪峰,并在防洪附近地区布置分洪工程,组成堤防、水库、分洪区等综合防洪体系。常遇洪水的泄洪机会较多,宜采用永久性工程措施;特大洪水,辅以临时性非常措施。

防洪系统运用程序为,首先尽量利用河道泄洪水,然后利用水库削峰,最后配合分洪工

程分蓄洪水。

二、长江治理规划与成就

长江流域降水量丰沛,且不均衡。全流域性大范围暴雨,会形成持续时间较长的全江性大洪水;比如 1788、1849、1931、1954、1998 年洪水。区域性特大暴雨会形成量大、而洪峰特高的部分干、支流洪水;比如 1227、1860、1870、1905、1981 年的长江上游洪水;1935、1995、1996 年长江中下游洪水及 1983 年汉水洪水等。

中华人民共和国成立后,按“防止水患兴修水利,以达到大量发展生产的目的”,开始着手长江治理规划研究工作。1950 年即组建了长江水利委员会。1951 年提出了以防洪为主的治江三阶段战略规划。第一阶段:大力加固堤防,以防御实际出现过的最高洪水位为目标;第二阶段:利用中下游湖泊洼地多的特点,有计划地开辟分蓄洪区,蓄纳超过堤防防御能力的超额洪水量,以保重点防洪区的安全;第三阶段:结合兴利修建干、支流水库调蓄洪水,以达到“根治”的目的。

1959 年正式完成的《长江流域综合利用规划要点报告》提出,以防洪、发电为主的水利枢纽开发计划;以灌溉水土保持为主的水利化计划,以防洪、除涝为主的平原湖泊区综合利用计划及向相邻流域调水计划。

新中国成立以来治理开发长江的实践,说明规划的指导思想、总体布局 and 综合开发治理的主要方案是正确的。对长江中下游约 3600km 干堤和 30000 多 km 支堤、民堤进行了整修加固。在中游建成了荆江和汉水杜家台分洪工程;洪湖隔堤工程,建立了可纳蓄洪水逾 500 亿 m^3 的蓄洪垦殖区。进行了荆江河段中洲子、上车弯等裁弯工程;完成了逾 600km 的护岸保滩工程。兴建了各类水库 48000 多座,总库容量逾 1200 亿 m^3 。建成万亩以上灌区 1800 多处。建成排水涵闸 7000 多座,机电排灌站约 800 万 kW。建成水电站装机容量达 2000 多万 kW。修建通航建筑物 350 多座。

上述工程完成后,长江防洪能力有所提高。荆江河段堤防的防洪能力由 1949 年防御 4 年一遇的标准,提高到防御 10 年一遇的洪水。配合运用分蓄洪工程后,可防御 40 年一遇的洪水。农田有效灌溉面积比 1949 年增加 1 亿多亩,灌溉耕地面积占总耕地面积的 63%。7000 多万亩低洼易涝农田 80% 以上得到治理。

仍存在下述问题。防洪能力仍普遍较低,遇特大洪水仍可能发生毁灭性灾害,低洼易涝地区还有 1200 万亩农田缺乏可靠排涝措施,全流域还有约 1.3 亿亩农田缺乏有效的灌溉设施;水土流失仍较严重;长江中下游部分河段河势尚不稳定,江岸崩塌现象严重,影响防洪、航运及岸线利用。

为此,长江水利委员会在总结前 30 多年治江工程经验的基础上,于 1990 年正式提出《长江流域综合利用规划》(1990 年修订)。国家也在第八个五年计划期间,确立了水利作为国民经济和社会发展的重要基础设施和基础产业的地位。按照统一规划、全面发展、适当分工、分期进行的方针,提出继续提高干支流防洪能力,消除洪水灾害,是治理开发长江的首要任务。要求达到荆江河段防御 100 年一遇的洪水,其他河段要防御 1954 年洪水。易涝地区要求近期达到 10 年一遇暴雨的排涝标准。近期开发水电装机 5500 多万 kW,投产 3300 多万 kW。

在众多工程措施中,长江三峡水利枢纽是治理开发长江的关键性骨干工程,是综合解决中华民族的心腹之患—长江中下游洪水灾害的关键工程,采用“一级开发、一次建成、分期蓄水、连续移民”的建设方案,于1994年开工兴建,1997年11月大江截流成功,目前已进入主体工程大规模施工阶段。三峡工程总库容393亿 m^3 ,防洪库容221.5亿 m^3 ;装机容量1820万kW,年发电量847亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,具有巨大的防洪、发电、航运、旅游效益。

三、治理长江的基本经验

通过近50年的综合治理,长江流域众多水利工程不仅有巨大的水电能源、城乡供水、航运、旅游等综合经济效益,社会效益也非常巨大。仅对长江1995、1996两年的防洪经济效益估算,都在600~800亿元左右,显示了防洪建设也是一项投入少、收益大,回报率很高的工程项目。

在治理长江的规划、设计、管理及资金筹措方面,取得下述基本经验:

(1)做好长江流域内各类专项规划和规划中重大项目的前期工作,是加速治理开发全流域水资源的基础。因此应加大前期工作经费的投入。

(2)治本是目标,但往往限于时间紧迫及财力不可能在短期内满足治本的需要。因此,必须实行“标本兼治”,不断向“治本”目标推进。

(3)总结长江各支流治理开发经验,表明凡防洪方面考虑不周,而单纯侧重兴利,都是失策。因此,必须坚持以防洪为主的治江规划。

(4)兴建具有巨大防洪库容的三峡水利枢纽工程,才能解除长江洪水对中游地区带来的毁灭性灾害。但要全部解决长江中下游洪水威胁,还必须辅以继续建设山谷水库及其他防洪工程。

(5)平原河道单纯加高堤防来提高防洪标准是有限的,且带来更大的风险。对一些河段、湖域进行疏挖,并将疏挖的泥沙作为构筑安全台、堤的材料,有较好的成效。

(6)单纯排涝的大型泵站利用率低。可在排涝之余,利用已有设备,进行调相运行,向系统输送无功,提高设备利用率。

(7)应重视防洪非工程措施在防汛工程中的重要作用,为此要加强通信及防汛部门自动化建设、建立科学的防汛管理体制,加强河道管理,确保河道行洪畅通。

(8)采用多元化、多渠道、多层次的水利投资体系,执行投资有偿使用政策,有利于筹措和确保水利资金的投入。

(9)为确保水利工程长期效益,加强了水利工程管理。在初步设计阶段安排工程管理设计。在建项目全面推行项目法人责任制、招标投标制、建设监理制。建成后,加强统一管理、统一调度、重点扶持、综合配套,建立便于监督的管理机制。

第二章 堤防渗流控制特点及其设计

长江中下游堤防总长约3万km,是长江防洪工程体系的基础。其中主要堤防长达8000

余 km,是国家堤防建设重点。长江堤防多系人力填筑,坝身及堤基缺乏可靠的渗流控制措施是历年汛期产生险情的主要原因。在堤防加固工程中,掌握堤身工作及地基渗流特点,采用合理渗流控制措施是确保堤防安全度汛的重要前提。

一、堤防工程特点

(1)堤防轴线位置多系历史形成和河势控制决定,不能随意选定防渗条件好的部位,且多修建在含有深厚透水层或软土层的冲积平原上。

(2)堤线长,但堤身及其挡水水头不高,因此多采用均质断面。

(3)除悬河外,挡水时间仅为汛期洪水时段,陆侧地下水位、湖塘水位大多数时间高于河水位,需要通过堤基排渗。

(4)由于堤身长期不挡水,易产生干缩裂缝,黏性土堤身易出现蚁穴、兽洞,往往过几年要全面锤探检查、灌浆一次。

(5)为满足桥梁、码头、通道、排水及供水要求,招致穿堤建筑物多、渗漏薄弱环节多。

(6)往往分期填筑加高、加固,堤身填料及结构复杂。

(7)位于居民区,对其防渗可靠性要求高。城区堤防及地基不能有外漏渗水,以安定民心。

二、堤防地基渗透性

1. 不同土层的渗透系数

见表 1-2-1。

表 1-2-1

不同土类的渗透系数 K 值

土 类	黏 土	粉质黏土	粉质粉土	粉 砂	细 砂	中 砂	粗 砂	砾 砂
$K(\text{cm/s})$	$<1.2 \times 10^{-6}$	1.2×10^{-6} ~ 6×10^{-5}	6×10^{-5} ~ 6×10^{-4}	6×10^{-4} ~ 1.2×10^{-3}	1.2×10^{-3} ~ 6×10^{-3}	6×10^{-3} ~ 2.4×10^{-2}	2.4×10^{-2} ~ 6×10^{-2}	6×10^{-2} ~ 1.8×10^{-1}

2. 渗控措施及其计算与渗透系数相对比值关系

渗流流网形态、逸出梯度、平均梯度只与堤身填料、地基土层渗透系数 K 值的相对比值及分布有关,与渗透系数绝对值大小无关(但影响渗水量)。因此,主要根据堤身及地基各土层渗透系数相对比值确定合理渗控措施及结构。

(1)堤身填料、地基土层的渗透系数相差 5 倍以内的相邻薄层可视为一层,采用加权平均渗透系数作为计算依据。

(2)当透水地基深度大于建筑物不透水底部长度 1.5 倍以上时,可按无限深透水地基计算。透水层越浅、薄,出口处等势线越密,垂直方向的出逸梯度越大。因此,透水层浅、薄时,出险可能性反而大。

(3)比上层地基土渗透系数小二个数量级的下卧层可认为不透水层。

(4)下层土比上层土的渗透系数小一个数量级,可认为属相对不透水层[一般取 $K_{\text{下}} \leq (\frac{1}{30} \sim \frac{1}{50}) K_{\text{上}}$],防渗墙或帷幕可伸入该相对不透水层内。

(5)上层土的渗透系数比下层土小一个数量级时,下层土内便可能产生承压水。

(6)斜墙、心墙及铺盖用土的渗透系数宜比相邻土层的渗透系数小二个数量级;相差三个数量级时,可认为是不透水防渗体。

(7)透水盖重用土的渗透系数,宜比堤基表层土的渗透系数大一个数量级。

3. 渗流梯度

开始发生渗透变形以前的最大渗流梯度,为临界梯度。当渗流梯度小于临界梯度时,管涌土的土粒处于渗透静稳定状态。土体内部结构产生渗透破坏的最小渗流梯度,为破坏梯度。当渗流梯度小于破坏梯度时,管涌土处于渗透动稳定状态。流土的临界梯度与破坏梯度相接近。砂性土的破坏梯度约等于土的浮容重。

防止管涌出现的允许梯度,采用临界梯度除以 1.5~2.0 的安全系数;或破坏梯度除以 2~3 的安全系数。防止流土出现的允许梯度,采用破坏梯度除以 2~3 的安全系数。

(1)允许逸出梯度:粉砂 0.25~0.3,粉土(砂壤土)0.4~0.5,粉质黏土(壤土)0.5~0.6。砂性土亦可根据不均匀系数 C_u 及级配查表 1-2-2。

表 1-2-2

砂性土允许逸出梯度

渗透变形形式	流 土 型			过 渡 型	管 涌 型	
	$C_u < 3$	$C_u = 3 \sim 5$	$C_u > 5$		级配连续	级配不连续
临界或破坏梯度	0.8~0.9	0.9~1.0	1.0~1.6	0.40~0.6	0.2~0.4	0.1~0.3
允许逸出梯度	0.25~0.35	0.35~0.5	0.5~0.8	0.25~0.4	0.15~0.25	0.1~0.15

(2)允许平均梯度:浅表层为深厚砂性土,又无垂直截渗措施时,平均渗流梯度应满足表 1-2-3 要求。否则应采取措施延长渗径。由于动水压力只与渗流梯度有关,与渗透流速无关,因此延长渗径有利于边坡稳定。

表 1-2-3

允许平均渗流梯度

土 层	粉 砂	细 砂	中 砂	粗 砂	中 细 砾	砂 壤 土	软 黏 土
允许平均梯度	0.05~0.07	0.07~0.1	0.10~0.13	0.13~0.17	0.17~0.22	0.15~0.25	0.3~0.4

(3)有可靠反滤层的黏性土层允许梯度:取破坏梯度(流土约 50~80、接触流土约 10~40)除以 6~12 的安全系数。

(4)黏性土均质堤的渗流渗出坡面无保护材料时,为满足背水坡渗流出逸部位不产生流土破坏,应满足 $\tan \theta < 0.5 \tan \phi$ 要求(式中: θ 为坡角, ϕ 为坡面土的内摩擦角)。

(5)砂性土堤的背水面有渗流出逸部位,为防止坡面发生渗流破坏,应不陡于 1:3。

(6)两种互相接触土层的有效粒径之比 $D_{10}/d_{10} > 10$ 时,上层介质的荷重对下层土的阻力不发生作用。当渗透系数比值又大于 2 时,便有产生接触冲刷可能,其临界梯度 J_c 为:

$$J_c = 0.21(\gamma_s - \gamma) \left(\frac{1 - n_1}{D_{20}} + \frac{1 - n_2}{d_{20}} \right) d_{20} \quad (1-2-1)$$

式中: n_1 、 n_2 分别为上、下两层土的面积孔隙率; D_{20} 、 d_{20} 分别为上、下两层土的等效粒径。

三、不同地基的渗流特点

长江中下游堤防地基中的第四纪沉积物有河床相沉积(上部为粉细砂,下部为砂砾石、砂卵石)、湖相沉积物(杂色黏土、粉质黏土)、河漫滩相及溃口冲积扇沉积物(由砂、砂壤土、壤土及粉质黏土组成互层或呈透镜体形态存在另一种土层中)。组成以下三种具有不同渗流特性的地基结构。

(1)单一地基。为级配和透水性较均匀的均质结构。一般不会对堤基内产生承压水。单一黏性土地基,渗流问题不大。单一砂性土地基为管涌险情多发堤段。

(2)双层地基。沿江较普遍,由表层弱透水黏性土、下卧强透水砂层组成二元结构。但上部相对弱透水层内,往往有较强、较弱透水层组成互层结构。根据土层结构及其赋水、透水特性,又可划分为上层滞水含水层和孔隙承压两大含水层。当表层土的渗透系数小于下层土的0.1倍时,地基中便可能产生承压水。因此,互层结构还可能形成多层承压水。由于在堤外受水流冲刷作用,深泓下切,表层弱透水黏性土层被冲去,使江水直接进入下卧砂层、砂卵石层,致使汛期堤内弱透水层下形成消减慢的高承压水头。由于天然或人为因素,致使表层黏性土厚薄不均,抗渗强度大小不等,在堤后背水侧往往有取土坑形成的水塘、湖泊或低洼地。在汛期高水位长期作用下,黏性土层的薄弱处,有可能被承压水顶穿,形成集中出水口,发生管涌或流土。

(3)多层地基。强弱透水层形成互层结构,可形成多个承压水层。当表层透水性较紧邻下层弱,渗流特性与双层地基接近,当表层透水性较紧邻下层强,按单一砂层分析表层渗透稳定性和双层地基分析两层及两层以上地基土的渗透稳定性。

堤防外侧的浅滩,既是防冲又是防渗屏障。但长江岸坡多以斜坡形式出现,漫滩不发育,滩地宽度多小于30m。城镇附近的人类活动常使堤防地基上部土层复杂,堆存有透水性强的素填土、杂填土。堤前漫滩及堤后地表黏性土层往往遭到人为破坏,抗渗能力大为削弱。

地基表层黏性土厚度,对堤基渗透稳定性有重要作用。当其厚度不足5m时,为薄层黏性土与下部砂性土组成的二元结构,汛期易出现险情。5~10m厚,为中厚黏性土与下部砂性土组成的二元结构,在无渊塘、沟谷切割条件下,渗透稳定性较好。表层黏性土厚度超过10m时,各种渗流地基结构,均有较好渗透稳定性。

四、渗流控制设计原则

大坝横亘于河床中,而堤防为筑于两岸漫滩上;堤线及防渗轴线不能随意选在渗控条件较好部位;堤线长、挡水水头却不高,时间也不长,常须考虑双向渗流条件;现有堤防大多未进行专门渗流控制设计及防渗处理,历时大多久远,附近常有密集居民区。基于这些特点,它与大坝挡水建筑物渗流控制设计有不同特殊要求。

(1)堤防地基渗流控制以渗径及逸出梯度控制为主。长江堤防地基粉细砂层下面往往有强透水中粗砂、砂卵石层,逸出点渗流近于垂直向上,产生渗透变形的临界梯度 J_f ,可由单位体积土的力平衡方程可得出。

$$J_f = \left(\frac{\gamma'_s}{\gamma} + \frac{\sigma}{\gamma} \right) \tan \phi \quad (1-2-2)$$

$$\gamma'_s = (\gamma_s - \gamma)(1 - n)$$

式中: γ'_s , γ_s , γ 分别为砂土浮容重、颗粒容重及水容重, kN/m^3 ; σ 为单位体积土所承受的垂直荷载, kN/m^2 ; ϕ 为砂土内摩擦角; n 为砂土空隙率。

双层地基的上部黏性土抵抗承压水破坏梯度 J_c 为

$$J_c = \alpha \frac{\gamma'_s}{\gamma} \quad (1-2-3)$$

式中: α 为土体颗粒形状系数。无粗粒土为 1.0, 砂粒 1.16 ~ 1.17, 有锐角的不规则颗粒土为 1.5, 混合砂砾料 1.33。

式(1-2-3)表明, 当堤内表层黏性土厚度不少于堤身挡水的水头时, 便不易出现突涌破坏。

可承担水头差 H 分别为

$$H = \frac{LJ_f}{k} \quad (1-2-4)$$

及

$$H = \frac{TJ_c}{k} \quad (1-2-5)$$

式中: L 为出险地点的上游水平渗径长度; T 为黏性土层厚度; k 为安全系数, 不宜小于 1.5。

对于重要堤防及表层为深厚透水层地基, 考虑到地基土不均匀性等原因形成渗透通道的偶然性因素影响, 出口为水平向渗流的平均渗流梯度宜满足表 1-2-3 所列要求。

(2) 一般渗流控制原则是上堵下排。但长江干堤, 上堵往往难以实施。若采用铺盖, 由于河床冲淤演变无常, 难以将迎水面外露砂层全部封闭。透水层深厚, 采用垂直防渗完全截断透水层工程量大, 悬挂式帷幕效果又有限。因此, 宜优先采用“导压兼施, 以导为主”方案。

(3) 堤内地面一般高于江河水面, 堤内地下水位与江水保持一定水力联系, 有利于利用、开采地下水, 排除渍水, 防止或减少冷浸田和盐碱化。有上述要求部位, 不宜长范围采取截断全部渗流方案。尤其是丘陵山区城市, 地下水与河水交换频繁, 而堤防挡水时间又很短, 更不宜采用全部截渗方案。须考虑堤内水位高于江河水位时的地基抗渗稳定性。

(4) 城镇堤防即使为非危险性渗水, 也会引起人们恐惧感。凡不能完全截渗部位, 其背水侧及地基内应设置导渗设施, 不允许有外漏渗水或散浸现象。为确保堤身渗流安全少占地及美化城市, 宜采用截断杂填土、素填土及浅层透水层的钢筋混凝土防洪墙结构。

(5) 堤防防渗轴线长、防渗工程量大, 一般只能在枯水期施工。当承担水头差不大, 需采用垂直防渗措施时, 宜采用表 1-2-4 所述施工速度快、成本低的垂直截渗方案。堤防大多时间不挡水, 枯水位以上部位的防渗体不宜采用因失水而干裂的防渗料(水下抛土、自凝灰浆、固化灰浆等)。堤防挡水时间短, 形成的浸润线前锋面不会逸出地面、坡面时, 亦可不设置垂直防渗系统; 或采用悬挂式垂直防渗系统延长渗径, 使渗流逸出坡面或地面时间长于堤防挡水时间, 即可满足安全要求。均质土堤防挡水后, 浸润线前峰面向堤内延伸的距离 L (单位: m) 按式(1-2-6)计算。

$$L = \sqrt{\frac{2k}{M}(h_c + h)t} \quad (1-2-6)$$

表 1-2-4 堤防垂直防渗措施工程特性表

项 目	深层搅拌桩		高压喷射灌浆		板桩灌注墙 切槽灌注墙	混凝土防渗墙			土工膜	
	多头小直径 搅拌桩	单头或双头 搅拌桩	定喷、摆喷	旋 喷		射 水 法	薄型液压 抓斗法	链斗式或 液斗式掘 槽机、拉槽机	铺 膜	插 膜
破坏渗流 梯度	粉细砂 200 ~ 300, 中粗砂 200 ~ 300	100 ~ 200	800 ~ 1200	500 ~ 600	300 ~ 450	300 ~ 600	300 ~ 600	300 ~ 600	破坏水头 大于 60m	破坏水头大于 60m
允许渗流 梯度	粉细砂 30 ~ 40, 中粗砂 30 ~ 40	20 ~ 30	80 ~ 100	50 ~ 60	60 ~ 70	普通混凝土 80 ~ 100, 塑性混 凝土 60 ~ 80	普通混凝土 80 ~ 100, 塑性混 凝土 60 ~ 80	普通混凝土 80 ~ 100, 塑性混 凝土 60 ~ 80		
深度 (m)	18 (宜 14 ~ 15)	18	25 ~ 30	20 ~ 25	25	22 ~ 30	50	20 ~ 25	16	12
有效厚度 (cm)	10 ~ 30 (桩径 22 ~ 40)	直径 50 ~ 70	10 ~ 30 (孔距 120 ~ 200)	直径 70 (单管) ~ 150 (双管) (孔距 50 ~ 100)	10 ~ 30	20 ~ 35	30 ~ 40	20 ~ 44	土工膜 0.03 ~ 0.05	复合土工膜 0.13
防渗体渗透 系数 (cm/s)	粉细砂 10^{-7} ~ 10^{-8} , 中粗砂 10^{-5} ~ 10^{-7}	10^{-5} ~ 10^{-7}	10^{-5} ~ 10^{-7}	10^{-5} ~ 10^{-6}	10^{-6} ~ 10^{-7}	普通混凝土 $< 10^{-7}$, 塑性混 凝土 10^{-6} ~ 10^{-7}	普通混凝土 $< 10^{-7}$, 塑性混 凝土 10^{-6} ~ 10^{-7}	普通混凝土 $< 10^{-7}$, 塑性混 凝土 10^{-6} ~ 10^{-7}	土工膜 10^{-11} ~ 10^{-12}	土工膜 10^{-11} ~ 10^{-12}
防渗体无 侧限抗压 强度 q_u (MPa)	粉细砂 1.0 ~ 3.0, 中粗砂 2.0 ~ 7.0	0.5 ~ 2.0	4.0 ~ 20.0	黏性土 2 ~ 10 砂性土 8 ~ 14	2 ~ 10	普通混凝土 > 10 , 塑性混 凝土 1 ~ 3	普通混凝土 > 10 , 塑性混 凝土 1 ~ 3	普通混凝土 > 10 , 塑性混 凝土 1 ~ 3		
防渗体 变形模量 (MPa)	350 ~ 1000	(120 ~ 150) q_u	2000 ~ 5000	1000 ~ 8000	600 ~ 2300	普通混凝土 12000 ~ 20000, 塑性混凝土 300 ~ 800	普通混凝土 12000 ~ 20000, 塑性混凝土 300 ~ 800	普通混凝土 12000 ~ 20000, 塑性混凝土 300 ~ 800		
工效 (m^2 /台班)	70 ~ 90	40 ~ 60 (80 ~ 120 延米)	100 ~ 200	30 ~ 50	80 ~ 160	50 ~ 100	50 ~ 80	60 ~ 150	60 ~ 150	40 ~ 60
台班工作 人员	13 ~ 15	13	20	13 ~ 20	13	20	15	10 ~ 18	10 ~ 18	15
单价 (元/ m^2)	100 ~ 150	150 ~ 270	260 ~ 350	400 ~ 600	180 ~ 200	180 ~ 260	200 ~ 280	200 ~ 250	60 ~ 100	60 ~ 100

续表

项 目	深层搅拌桩		高压喷射灌浆		板桩灌注墙 切槽灌注墙	混凝土防渗墙		土工膜			
	多头小直径 搅拌桩	单头或双头 搅拌桩	定喷、摆喷	旋 喷		射水法	薄型液压 抓斗法	链斗式或 液压力式锯 槽机、拉槽机	铺 膜	插 膜	
优 缺 点	施工噪音小,无污染,造价低,适应地基范围较广。难遇个别块石难以施工,形成以施工控制,变化较大。当水灰比大于1.0时,在地下水位以下部位形成的桩体有软心现象	可形成板状结构,格构式,可内插型钢或土。施工无噪音、无污染。大粒径材料难以施工。	适应地基条件广,施工进度快,最大深度可达60m,但超过25~30m易开叉,溢浆液多,形成墙体不均匀。不适于地下水位	适应地基条件广,单管旋喷需要空浆过多,深度超过20m,溢浆液多,化固时易不均匀。不适于地下水位	能形成防渗墙,施工速度快,整体性好,但形成墙体薄,仅能用于粉细砂、中砂及薄层砂砾	墙体质量好,厚度均匀,防渗效果较好,在砂性土中施工速度较快,还可用于塑性混凝土。当深度在12m以内,采用二套隔离体,可实现无接缝灌注。要求先用机械,斗体不宜小于5m(导杆式)~7m(导板式)以上。需采用接头管法(浅槽可平接),超过35m深度,要改用接头孔或加强接头管	墙体整体性好,厚度均匀,防渗效果较好,在砂性土中施工速度较快,还可用于塑性混凝土。当深度在12m以内,采用二套隔离体,可实现无接缝灌注。要求先用机械,斗体不宜小于5m(导杆式)~7m(导板式)以上。需采用接头管法(浅槽可平接),超过35m深度,要改用接头孔或加强接头管	墙体质量好,厚度均匀,防渗效果较好,在砂性土中施工速度较快,还可用于塑性混凝土。当深度在12m以内,采用二套隔离体,可实现无接缝灌注。要求先用机械,斗体不宜小于5m(导杆式)~7m(导板式)以上。需采用接头管法(浅槽可平接),超过35m深度,要改用接头孔或加强接头管	链斗式或液压力式锯槽机、拉槽机	造价最低,要求槽宽不小于20cm。铺膜后需用黏土浆,或采用自凝灰浆。铺膜时需用切割机,铺膜后可用铲斗进行,则宜回填砂性土	造价最低,不需先形成槽孔。插膜后,灌填水泥浆。水泥浆能抵抗植物破坏
适用范围	淤泥质土,黏性土,砂土及含有少量粒砂,宜用于互层地基;中灰比0.8~1.0)	淤泥、淤泥质土、粉质黏土、粉土、粉砂,宜用于互层地基(在淤泥质土中灰比宜为0.5)	淤泥质土、砂土及粒径大于100mm的砂卵石,无漫滩段	淤泥质土、砂土及粒径大于200mm的砂卵石,无漫滩段	粉土、砂及砂砾层	粒径不大于5mm的砂、砂砾层、黏性土。附加泵吸反循环后,可用于含少量粒径100mm以内的砂砾层,气举反循环,可达150mm	各种土层,能排除地下障碍。在城区堤段杂物及块石多,宜增宽60cm	粉土及砂土最大排渣粒径80mm,锯槽可用于含木材、废塑料较多的杂填土	粉土、砂及砂砾	粉土、砂及砂砾	粉土、砂及砂砾
备 注	淤泥及淤泥质土中的深搅桩性能同单头或双头深搅桩	淤泥质土、砂质土宜用定喷;卵石层宜用旋喷				底部位于土层时,宜用普通混凝土,底部嵌入岩层时,宜用塑性混凝土					