

DIFANG BINGHAI ZHENDUAN JISHU

周 杨 朱文仲 主编

堤防病害 诊断技术



黄河水利出版社

堤防病害诊断技术

周 杨 朱文仲 主编

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书在简要介绍黄河堤防工程特点、建设情况、历史险情和常见病害类型的基础上,提出了堤防病害诊断的概念、内涵,认为堤防病害诊断主要是利用探测、监测等主要诊断技术来获取堤防或单位堤段的基础诊断资料,通过对各种定性或定量基础诊断资料的分析处理,建立综合诊断与评价体系来分析单位堤段中已有的或潜在的危险及其严重程度,为堤防工程管理和防汛抢险动态决策提供科学依据。书中对堤防病害诊断所涉及的探测诊断、监测诊断及综合诊断等领域的基本方法、发展现状、关键技术和特点进行了介绍与分析,本书以推动堤防病害诊断工作的发展、提高堤防安全工作水平为目的,具有较强的实用性。

本书可供从事堤防工程管理、堤防质量检测的管理人员和技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

堤防病害诊断技术/周杨,朱文仲主编. —郑州:黄河水利出版社,2012.7

ISBN 978 - 7 - 5509 - 0190 - 2

I. ①堤… II. ①周… ②朱… III. ①堤防 - 管理 IV. ①TV871.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 157719 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11

字数:254 千字

版次:2012 年 7 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2012 年 7 月第 1 次印刷

定价:30.00 元

编写人员

主 编：周 杨 朱文仲

副 主 编：张清明

编写人员：王 锐 李长征 杨 磊 胡伟华 朱松立

常晓辉 赵志忠 王坤昂 谢义兵

审 定：冷元宝 刘红宾

审 核：乔惠忠 宋万增

特邀专家：于强生 常向前 朱萍玉 周福娜 曾宪强

前 言

堤防工程是重要的防洪工程之一,其主要作用是约束水流,抗御风浪和海潮,限制洪水泛滥,保护两岸工农业生产和人民生命财产安全等。据不完全统计,截至2010年,我国已建成江河堤防29.41万km,其中一、二级达标堤防长2.79万km。

1998年特大洪水以后,我国在大江大河上斥巨资进行重点堤段除险加固,使得堤防工程的抗洪能力整体得到了明显增强。但由于堤防工程自身的复杂性和施工技术水平的限制,目前相当数量的堤防工程仍存在一些不可忽视的问题,主要有:堤防施工质量未达到规范要求的标准,主要江河防洪标准仍然偏低;堤身内存在许多古河道、老口门、遗留的构筑物、虚土层、透水层等隐患,在洪水期间极易形成渗水、管涌、漏洞、散浸、跌窝等险情;生物破坏问题严重,南方的白蚁,北方的獾、狐、鼠类,对堤防的破坏作用很大;堤防存在不同程度的老化、沉陷和变形现象,需进行系统的检测与维护;堤防查险手段主要靠人工拉网,现代探测、检测、监测技术在堤防上的应用需进一步增强。随着堤防保护区内社会经济的迅猛发展,堤防工程在防洪减灾中的地位不断加强,因此加强堤防工程病害诊断工作对于堤防设计、除险加固、防汛抢险、工程运行管理具有重要意义。鉴于此,我们组织相关专家编写了此书。

本书共四章,对堤防病害诊断的概念及内涵作了细致的论述,堤防工程病害诊断是利用探测、监测、检测等诊断技术来获取堤防或单位堤段的基础诊断资料,通过对各种定性或定量基础诊断资料的分析处理,建立综合诊断和评价体系来分析单位堤段中已有的或潜在的危险及其严重程度,为堤防工程管理和防汛抢险动态决策提供科学依据,其内容主要包括专项诊断技术和综合诊断系统两大方面,本书对堤防工程探测诊断技术、监测诊断技术和综合诊断与评价技术作了重点阐述。

本书编写人员及编写分工如下:第一章由王坤昂、胡伟华、朱松立编写,第二章由赵志忠、李长征编写,第三章由王锐、张清明编写,第四章由杨磊、谢义兵、常晓辉编写。本书由周杨、朱文仲任主编,由张清明任副主编。

本书由冷元宝、刘红宾审定,由乔惠忠、宋万增审核。于强生、常向前、朱萍玉、周福娜、曾宪强对本书给予了具体的指导和帮助,提出了宝贵的意见。本书在编写和出版过程中得到了黄河水利委员会建设与管理局、黄河水利委员会国际合作与科技局、黄河水利科学研究院等有关方面的关心和支持,在此一并表示衷心的感谢。

本书着眼点高,意在梳理和总结堤防诊断新技术、新经验,强调实用性,注重理论与实践相结合,是水利工程技术人员、管理人员及相关水利管理部门不可缺少的参考书,有利于防汛抗洪工作规范化、科学化。

由于受编写时间的限制,书中不妥之处在所难免,敬请广大读者和专家批评指正,在此表示诚挚的谢意!

编 者
2012 年 3 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 堤防工程概况	(1)
1.2 堤防工程病害诊断	(7)
第2章 探测诊断技术	(9)
2.1 堤防病害地球物理特征	(9)
2.2 瞬变电磁法	(9)
2.3 瞬态面波法	(21)
2.4 脉冲压缩和阵列激发	(32)
2.5 高密度电法	(41)
2.6 地质雷达法	(53)
第3章 监测诊断技术	(68)
3.1 堤防监测内容	(68)
3.2 堤防监测方法	(68)
3.3 分布式光纤传感技术	(71)
3.4 基于监测的图像重建算法研究	(108)
第4章 综合诊断与评价技术	(123)
4.1 堤防工程风险分析	(123)
4.2 堤防工程安全评价	(133)
4.3 基于数据驱动的堤防病害诊断方法	(157)
参考文献	(167)

第1章 绪论

1.1 堤防工程概况

1.1.1 堤防工程特点

堤防是为防止洪水(或风暴潮)侵袭,沿江、河、海、水库以及分蓄洪区周边修建的挡水建筑物;是人们为了保护农田、工厂和自身的生存和发展而逐步兴建与扩展的水利工程;是防洪工程体系的重要组成部分。

堤防工程具有以下特点:

(1)季节性或周期性发挥作用。在汛期洪水达到一定程度以后或风暴潮来临时才挡水,有时一年一次或数次发挥作用,有时则数年才发挥作用。挡水时间较短,仅数天或数十天。

(2)堤防高度一般不大,多在数米至10余m。

(3)堤防工程一般为长条形建筑物或带状建筑物,常跨越阶地、漫滩、古河道、冲沟等多个地貌单元。

(4)地基多为第四纪松散沉积物,其物质组成、分布及厚度变化大,地质条件较复杂。少数为基岩,地质条件较简单。

(5)已建堤防多为历次培修而成,堤身填筑土组成及密实程度不均一。

(6)各类穿堤建筑物较多。

我国很多重要城市和3000多万 hm^2 农田都在江河的中下游,需要依靠堤防保护。据统计,堤防保护面积虽不到全国总面积的10%,但所保护的耕地面积占堤防保护面积的30%、保护的人口占全国总人口的50%以上、保护区内的农业产值约占全国农业总产值的60%、工业产值占全国工业总产值的70%以上。因此,一旦大江大河发生特大洪水,引起改道性的溃堤决口,后果将不堪设想。虽然我国各大江大河已初步建成了防洪体系,具有一定的抗洪能力,但1998年特大洪水仍受到了严重损失,受淹面积达6610 km^2 ,受灾人口2.3亿人,直接经济损失2600多亿元。

1.1.2 堤防工程建设

我国堤防工程建设历史悠久,是随着人口增长和经济发展而逐步修建起来的。新中国成立后,党和政府十分重视防洪工作,在积极安排防洪体系工程建设的同时,加强了堤防工程建设。截至2010年,全国已建成江河堤防29.41万 km ,累计达标堤防12.14万 km ,堤防达标率为41.3%,其中一、二级达标堤防长度为2.79万 km ,达标率为78.4%。全国已建成江河堤防保护人口6.0亿人,保护耕地4700万 hm^2 。

黄河流域堤防主要集中在黄河下游,黄河下游大堤是随着河道变迁经历代不断修建而成现行河道两岸大堤的,东坝头以上建于明清时期,已有 500 多年的历史,东坝头以下是 1855 年铜瓦厢决口改道后修筑的,距今亦有 150 多年的历史。黄河下游临黄大堤长 1 371. 227 km,其中左岸长 746. 979 km,由于支流天然文岩渠和金堤河的汇入,以及保护对象不同,左岸堤防分为 3 大段 2 小段;右岸长 624. 248 km,受东平湖至济南山麓分隔,右岸堤防分为 2 大段 11 小段,现状大堤高 10 m 左右,最高达 14 m,临背河地面高差 4~6 m,最高达 10 m 以上(如开封大王潭);堤防断面顶宽 7~12 m;艾山以上临背河坡一般为 1:3,艾山以下临河坡为 1:2.5,背河坡为 1:3。黄河下游堤防工程现状见表 1-1。

表 1-1 黄河下游堤防工程现状

岸别	序号	堤段	桩号范围	堤防长度(km)	级别
左岸	一	第一大段:孟县中曹坡至封丘鹅湾	0+000~200+880	171.051	1
		其中孟县中曹坡至温县单庄段	0+000~15+600	15.6	4
	二	第二大段:长垣大车集至濮阳张庄闸	0+000~194+485	194.485	1
	三	第三大段:濮阳张庄闸至利津四段	3+000~355+264	350.123	1
	四	第一小段:贯孟堤	0+000~9+320	9.32	1
	五	第二小段:太行堤	0+000~22+000	22	1
		左岸合计		746.979	
右岸	一	孟津堤	0+000~7+600	7.6	2
	二	第一大段:郑州邙山根至梁山徐庄	-1+172~336+600	340.183	1
	三	河湖两用堤	徐十堤 0+000~7+245 国十堤 7+245~10+471	10.471	1
	四	东平湖附近 8 段临黄山口隔堤		8.854	1
	五	第二大段:济南宋家庄至垦利二十一户	-1+980~255+160	257.14	1
		右岸合计		624.248	
		总计		1 371.227	

1.1.3 堤防工程历史险情

黄河是多泥沙河流,泥沙淤积使下游河床不断抬高,“地上悬河”形势越来越严峻,河道萎缩,洪患日趋加重。河床抬高导致同流量洪水水位大幅度升高。据有关资料,下游主要水文站同流量($3\,000\text{ m}^3/\text{s}$)的水位相比,1985 年较 1952 年高 1~3 m,加上“二级悬河”的出现,使得洪水威胁黄河河床的抬高日益严重,导致高水位运用时,堤身的背河出溢点高,堤脚渗漏,严重威胁堤防安全。

黄河大堤险点险段主要表现为潭坑(老口门)、堤身裂缝、堤身缺口、顺堤行洪、渗水段、堤身残缺段(高程、坡度不够)、病险涵闸、影响堤防安全的穿堤建筑物及其他,出险特点综合归结为以下四大类:

(1)以管涌、流土为代表的堤基渗透变形。管涌是黄河下游堤防在特大洪水期间比较常见的险情,如抢护不及时,时间久了洞径扩大,有可能发展成漏洞或脱坡塌陷等更大险情,危及堤防安全。历史上黄河堤防出现的管涌险情多出现在堤内坡脚不远处的低洼地带,距堤内脚30~50 m。黄河下游堤防堤基的表土层很少是砂砾层,因此地基的渗透破坏一般为流土破坏。流土首先发生于渗流出口,不可能在土体内部发生,当渗透力克服了重力的作用时,土体就会产生流土破坏。流土与管涌相比,其发生要求有更高的渗透比降,一旦流土发生,非常容易引起溃决,危害性更大。

(2)以渗水、滑坡为代表的堤身渗透变形。由于黄河下游堤防部分断面不足,堤身单薄,堤身土质以砂性土为主,加上筑堤质量差,因此在洪水时期,水压力增大,时间稍长,河水透过堤基或堤身在背河堤坡或堤脚出现渗水,这是黄河下游堤防最常见的险情。其特征是堤防背水侧坡面湿润、松散或有浸润纤流。散浸冲刷是堤身渗透破坏的主要形式之一,严重散浸将诱发堤身漏洞和堤身管涌以及脱坡滑坡的发生。

(3)以穿堤建筑物接触冲刷为代表的穿堤建筑物险情。穿堤建筑物的渗流破坏多是沿地基土、顶部填土或侧向与建筑物的接触面产生的,接触冲刷开始发生在填土与建筑物接触部位,先是接触部位颗粒从渗流出口被带走,进而形成渗流通道,引起堤防溃决。由于接触冲刷发展速度往往比较快,因此对堤防的威胁很大。

(4)河势急剧变化引起的冲决险情。黄河下游属游荡性河道,作为历史上黄河下游三大决口形式之一的冲决,就是当大堤堤外无滩或滩岸很窄,而河势游荡摆动,在没有被控制的情况下突然变化,发生“横河”、“斜河”、“滚河”,主流将直接顶冲淘刷堤岸,造成堤防坍塌,抢护不及而决口。冲决发生率比较高,据统计,黄河在山东境内历年424个决口中,属于冲决的就有78个。各种险情之间相互联系、相互影响,往往一种险情的发生会引发多种险情,加剧险情的发展。

据黄河下游1949年以来历年大洪水期出险资料统计,堤基发生渗水(不包括堤身渗水)的堤段共有290处:河南省52处、山东省238处,左岸175处、右岸115处;属严重渗水的有112处,发生过渗透变形的有114处,其中109处堤段的堤基分布于老口门处,占全部渗水堤段的37%。发生渗水及渗透变形的时间多在1954年及1958年大洪水时期,经过多年来对大堤进行加固处理,洪水期发生渗水及渗透变形的堤段逐渐减少,但是在1976年及1982年大洪水时期,有些原来并不渗水的堤段,如山东省济阳县的邢家渡及天兴庄等,却发生了渗水问题。

1993年对黄河大堤险点、险段进行了统计,包括老口门、管涌、渗水、裂缝、堤身残缺、堤身缺口、顺堤行洪7项共28处险点,其中渗水13处占险点总数的46%。经检查,临黄大堤堤身浸润线在背河堤坡出逸的堤段占堤线总长的35%。近年来,虽然黄河来水量持续偏小,但险情仍有发生,如1996年8月洪水两次洪峰($7\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $5\,520\text{ m}^3/\text{s}$),山东黄河大堤就有21处出现险情,其中渗水、管涌14处,大堤裂缝6处,风浪淘刷1处。

综上所述,黄河下游临黄堤防在历史上大洪水时期发生渗水、严重渗水及渗透变形的堤段很多,问题也很严重,渗透变形仍是黄河堤防的首要问题,同时可以预见当发生大洪水时由渗流造成的险情仍将是非常严重的。

1.1.4 堤防工程病害

堤防工程病害是指埋藏于堤身及堤基内的动物洞穴、人类活动遗迹、腐朽树洞、古河道、坑塘、决口的老口门及堤身裂缝等,造成堤内洞穴纵横交错,“洞”、“松”、“缝”是堤防病害的主要特点,所有这些隐患,如不及时处理,会不断恶化,将严重危及黄河大堤的安全。

1.1.4.1 堤身病害

1) 堤身土质差、填筑不实

黄河下游大堤是在原有民埝的基础上逐步加高而成的,虽然经过多年的加固处理,但仍存在许多险点隐患和薄弱环节。受当时技术、设备和社会环境等条件的制约,历史上修筑的老堤普遍存在用料不当、压实度不够等问题;修堤土质多属砂壤土、粉细砂,渗透系数大;局部用黏土修筑的堤防易形成干缩裂缝。人民治黄以来,黄河大堤历经了四次大的加高改建,1950~1957年、1962~1965年、1974~1985年、1989~2000年各加高改建一次。1980年以前主要是靠沿堤农民推胶轮车筑堤,1989年以后使用铲运机与推土机配合筑堤,因此黄河大堤在1989年以前历次筑堤中,填筑标准较低,压实标准和相对密度远不能满足运行要求,尤其是逐年培高,新老结合面没有按照常规要求进行处理,是引起堤身裂缝、滑坡及塌陷的重要原因。

大堤堤身土体组成复杂,一般由砂壤土、黏土、壤土混掺而成,土质极不均匀,结构疏松;遇大水假堤,易于渗透逸出;暴雨时造成堤防不均匀沉陷,甚至坍塌。根据历史险情、隐患探测的成果和钻孔中漏水漏浆情况,加上室内土工试验测定的堤身土的黏粒含量、干密度和渗透系数等指标,充分说明堤身填筑质量不好,存在裂隙空洞等,引起堤身渗漏,表现为堤坡和堤脚部位的出渗。据检查了解,新中国成立前部分老堤的干容重仅 1.3 g/cm^3 。虽然人民治黄以来历经了四次较大规模的修堤,堤防加高培厚的质量相对较好,但也只是加固了外壳,堤身内部隐患仍然没有解决。

2) 洞穴及空洞

动物洞穴主要指獾、狐、地鼠、地猴等害堤动物在堤身内所挖掘的纵横通道及窝洞。当通道横穿大堤时,其危害更为严重。动物洞穴在黄河大堤上普遍存在,每年堤防检查都发现几十处獾洞,鼠洞更是到处可见。黄河下游大堤多年不靠水,獾洞多分布在堤坡中部,洞道处于设防水位以下;洞口多位于临河堤坡及坝坦的杂草丛中,不易被发现;洞道深入堤内直线长度达3~5.5 m,个别洞道甚至为穿堤洞。1982年,在开封县大堤上开挖一獾洞,伸入堤内长达26 m;1991年,在兰考大堤上解剖一鼠洞,伸入堤内长达120 m。

堤内的空洞多为抗日战争时期在大堤上挖掘的军沟、战壕、防空洞、群众的房基地、红薯窖、废涵洞、排水沟、废井、坟墓等,多数已发现并处理,如济阳县田兴庄堤基有坟地,1955年在进行锥探灌浆时,一眼孔曾灌入泥浆300多桶;1996年洪水期间在台前县大堤桩号176+700处背河堤身内发现一处较大的藏物洞。上述洞穴及空洞一般较为隐蔽,且动物洞穴还具有再生性,防不胜防,这些洞穴的存在使得堤身抗洪能力大大降低。

3) 堤身裂缝

堤身裂缝是近年来黄河下游堤防上比较突出的问题。在1999~2000年对下游671 km堤段的隐患探测调查中,共探出显著的堤防隐患1330处,其中具有明显裂缝或洞

穴等隐患的突出险点 468 处,土质不均匀的松散土及裂隙发育 862 处,裂缝下延深度为 6~10 m,深的可达 13 m;从历年普查资料看,堤身裂缝多数为纵向裂缝,少数为横向裂缝,且纵向裂缝近似呈直线展布,主要分布于背河堤肩路沿石处、临河堤肩路沿石处和堤防道路中间部位。堤身裂缝经雨水侵蚀形成陷坑、天井,破坏了堤防的完整性,一旦大水偎堤,横向裂缝直接形成渗漏通道,纵向裂缝则可能造成脱坡、崩岸,对大堤的安全极为不利。

黄河堤防堤身裂缝的产生主要有三方面的原因:一是堤身黏性土失水形成干缩裂缝;二是堤防培修时,新老堤身交接部位处理不当产生接头裂缝;三是由于堤身和堤基的土质、密实度不一致而产生不均匀沉陷裂缝。但从工程地质学角度分析,新构造运动造成的地壳不均匀沉降、断裂活动、地震活动也是堤身裂缝不断产生的内在原因。

1.1.4.2 堤基病害

1) 堤基地质条件复杂

黄河下游堤基地质条件复杂,主要是在堵口时将大量的秸料、木桩、砖石料等埋于堤身下,形成强透水层,口门背河留有坑塘和洼地,而且黄河所处位置工程地质条件颇为复杂,不同堤段堤身及堤基的土壤分布特点见表 1-2。

表 1-2 黄河下游堤防不同堤段堤身及堤基的土壤分布特点

堤段名称		堤身填土	堤基土质
右岸	邛山至东坝头	以砂壤土为主	粉土、细砂、壤土,有的堤段夹有薄层黏土
	东坝头至东平湖	砂壤土及轻壤土	壤土、砂壤土
	济南宋庄至王旺庄	壤土	壤土、砂壤土
	王旺庄至垦利	砂壤土、粉土	砂壤土、薄层壤土
左岸	曹坡至北坝头	砂壤土	砂壤土与中厚层壤土
	北坝头至张庄	砂壤土、壤土各半	夹有薄层黏土与壤土互层
	陶城铺至鹊山	壤土及砂壤土	砂壤土及薄层黏土
	鹊山至北镇	壤土及少量盐渍土	砂壤土、壤土互层
	北镇至四段	壤土及盐渍土	砂壤土夹有薄层黏土、盐渍土的透镜体互层,在靠近地面黏性土常有裂隙

黄河下游河道从孟津至清水沟入海口全长 878 km,临黄大堤长 1 371. 227 km,按地貌成因及形态划分,孟津至东平湖为冲积扇平原,地势西高东低,地层岩性主要为粉砂、细砂、中砂,颗粒组成自西向东变细,本区主要工程地质问题是渗透变形和地基液化;位山至蒲城一带为冲积平原区,大堤地基主要是以黏性土为主的多薄层结构,其次为双层结构;山东梁山县、东平县等东平湖附近地区为冲积湖积平原区,大堤地基多为以黏性土为主的多薄层类型,主要工程地质问题为沉降与不均匀沉降;蒲城以东河口地区为冲积海积三角洲平原区,河道内主要为粉砂、粉土及砂壤土,属高压缩性或中等压缩性的土壤,抗剪强度低。总的来说,黄河下游的工程地质问题有渗透变形、液化、沉降与不均匀沉降,老口门是

黄河大堤的特殊工程地质问题。

2) 历史上老口门、古河道多

历史上黄河下游河道变迁,总的趋势是决口改道越来越频繁,决口时大堤被洪水冲断,堤基也被洪水冲成宽窄不同、深浅不一的沟槽和口门。据统计,现状大堤老口门达390多处,较深的口门内常沉积有粉细砂和中砂,有时也有静水沉积的淤泥质土。堵口时,填筑在口门里的料物各种各样:一般较小的口门,在洪水回落后成为干口的,多用一般的土料进行填筑;对于有流水的大口门,堵口的料物非常复杂,有秸料、芦苇、树枝、木桩、麻袋、铅丝笼、块石、土料等。典型老口门的填料情况见表1-3。小口门的一般填筑土料(素填土)经过多年在大堤上及堵口土料的自重压实下已经固结,其稳定性较好。大口门堵口的秸料腐烂后可以形成空洞,在大堤受洪水浸泡土质变软后,容易产生裂缝和塌陷,当洪水冲刷到秸料层时,还可能产生渗漏及集中渗漏,危及大堤安全。较深口门的沟槽内新沉积的粉砂、细砂、中砂层及填充的块石、秸料等透水性大,容易在背河处产生渗水及渗透变形。堵口时,在水中填充的砂土、砂壤土及壤土的密度均较小,在浸水时易产生不均匀沉降,使大堤产生裂缝和下蛰;遇到强地震时,填充的土易产生液化现象。

表 1-3 典型老口门的填料情况

位置	口门宽度(m)	决口时间	口门填料
封丘县荆隆宫	1 250	1489 年、1492 年、 1631 年、1650 年	口门填料主要为麦秸、玉米秆,含少量荆条、小木块及树枝,已腐烂成黑色,混杂大量粉细砂及壤土团。最大冲刷深度为20~23 m
中牟县九堡	1 438	1843 年	上部为灰黄色、灰色砂壤土、粉细砂,含少量秸料;下部以灰色砂壤土为主,局部有细砂、粉砂,含较多的高粱秆、秸料、块石、树枝等。最大厚度为36 m
东明县高村	820 330	1880 年9月、 1879 年10月、 1921 年7月	秸料主要为高粱秆、玉米秆,有少量树枝、木桩、麻绳、夹黏土、壤土及砂壤土。秸料在地下水位以上的都已腐烂,地下水位以下为半腐烂状态。合龙口处厚4.7 m
郑州市石桥	1 670	1887 年8月14日	填料为秸秆、谷草、麻绳、木桩、竹缆、碎砖、土料等,冲刷深度为35 m
郑州市花园口	1 460	1938 年6月9日	柳石、铅丝笼、块石、秸埽、木桩、木排、土料

3) 近堤隐患多

黄河大堤洪水期的顺堤行洪及顶冲极易形成临河侧堤脚及堤坡冲坑等隐患;加之历史上黄河大堤决口频繁,填复时基础多采用柳秸料进行填堵,形成大量老口门隐患及背河塘坑。沿岸人口密集,近堤村庄多,村镇建设缺乏规划,填垫村房台取土及生产建设挖土造成大量临背河坑塘和低洼地。人民治黄以来,临黄大堤经历了4次大的加培,施工就近

取土,形成一些断面大、长度长的临河堤根河,不少堤河与串沟相连,同时有一些为农业灌溉与排水而修筑的近堤渠道,近堤村庄多,为生产生活需要而挖掘了大量的水井,且大堤背河侧地面低于临河地面,近堤临河侧冲坑、背河侧坑塘、水井、串沟的广泛分布对黄河防洪安全是极为不利的。

如黄河“96·8”洪水,花园口水文站流量为 $7\,600\text{ m}^3/\text{s}$,下游堤防发生渗水 51 处,长 40 km,管涌 8 处,堤身裂缝深 5.28 km;不少背河坑塘、水井水位抬高,给防汛增加了很大压力,从新中国成立以来几次大洪水近堤险情统计(见表 1-4)分析,堤防及近堤范围内渗水、管涌、漏洞等险情曾频繁发生,严重危及黄河防洪安全。

表 1-4 几次大洪水堤防及近堤险情统计

年份	花园口 水文站流量 (m^3/s)	假堤(m)		出险 次数	渗水长度 (m)	管涌 (处)	漏洞 (处)	出险频率 (%)
		长度	水深					
1958	22 300	—	4~6	1 998	59 962	4 312	13	39.9
1976	9 210	1 080	4~5	1 700	10 251	2 925	3	34.0
1982	15 300	887	2~4	1 136	6 619	83	3	22.7
1996	7 600	951	2~4	170	40 383	8	0	3.4

1.2 堤防工程病害诊断

具体而言,堤防工程病害诊断就是利用探测、监测、检测等诊断技术来获取堤防或单位堤段的基础诊断资料,通过对各种定性或定量基础诊断资料的分析处理,建立综合诊断和评价体系来分析单位堤段中已有的或潜在的危险及其严重程度,为堤防工程管理和防汛抢险动态决策提供科学依据。其内容主要包括专项诊断技术和综合诊断系统两大方面。

1.2.1 专项诊断技术

目前,用于堤防工程病害诊断技术多是以堤防隐患探测、堤防安全监测以及堤防安全检测等为主,另外还包括人工巡视检查和对堤防工程设计与施工的复核。

现在有关堤防监测、探测及检测方面的技术和方法研究国内开展得比较多,在堤防隐患探测方面,许多比较先进的隐患探测新技术被应用到工程实践中来,包括 ZDT-I 型智能堤坝隐患探测仪、SD-1 瞬变电磁仪、MIR-IC 直流数字电测仪、分布式高密度电阻率探测系统、聚束直流电阻率法以及地质雷达等,都为我国堤防隐患探测的发展作出了重要贡献;在堤防监测方面,许多专家和学者倾向于堤防自动化安全监控模式的开发,通过利用现代计算机先进的软、硬件技术,对堤防安全监测实现集成智能的数据管理、信息分析、推理和辅助决策,其目的也是能实时监控堤防的健康状况,确保堤防安全运行,充分发挥工程效益;而堤防安全检测主要是通过检测堤防工程在特殊气候、异常水情或运行状况严重异常时可能存在的缺陷、隐患和险情来判断堤防工程的短期健康状况,为堤防维护、维

修与管理决策提供依据和指导。

1.2.2 综合诊断系统

堤防工程的安全状况反映在诸多方面,如渗透、变形、应力、裂缝、滑坡等,这些影响因素实际上是相互有一定联系的,如堤防应力、变形与堤岸稳定性等之间就互有影响,因此仅仅采用某一专项诊断技术存在一定的不足,难以准确诊断堤防的安全状况,对堤防工程的诊断不仅要考虑单个测点、单个项目所反映的局部性态,还要考虑多个测点、多个项目所反映的整体性态。目前,有关堤防工程综合诊断的研究尚处于起步阶段,还没有形成统一的理论。

1.2.2.1 堤防工程风险分析

国内堤防工程风险分析技术研究虽然滞后于国外,但自1998年长江流域发生特大洪水灾害之后,国家对堤防与大坝的安全评价和风险分析工作极为重视,也引起众多学者的格外关注,大坝与堤防工程的风险分析研究得到迅速发展,目前堤防工程的风险分析主要集中于水文风险、堤防结构风险、失事后果等单项研究,且已经取得了一定的成绩,但堤防系统所建立风险计算模型的准确性、各种工况下失事风险的组合以及堤防系统的综合风险等许多综合性问题还需要进一步探讨。

1.2.2.2 堤防工程安全评价

国内对堤防工程安全评价的研究起步较晚。虽然堤防的安全评价已经作为堤防加固设计和立项审批的重要依据之一,但从有关资料可以看出,我国现阶段的堤防工程安全评价缺乏科学、规范、统一的堤防工程安全性调查评价的指标体系、调查方法和技术标准,因而在堤防加固设计之前都还没有进行过专门的安全评价工作,只是在加固设计的过程中进行堤防工程的安全论证和复核。因此,有必要在借鉴国内外一些现行方法的基础上,根据特定堤防工程的特点,探讨堤防工程安全评价的理论问题,建立适合我国国情的堤防工程安全评价导则,为堤防的安全运行、日常管理、除险加固提供强有力的保障。

1.2.2.3 基于数据驱动的堤防病害诊断方法

堤防工程作为一个大型系统,其诊断方法有其研究和应用对象的特殊性,但在方法和理论方面又与一般大型系统的故障诊断有很多相同之处。基于数据驱动的堤防健康诊断方法,充分利用数据信息,更好地诊断堤防病害的原因,正确评估堤防工程的健康状态,对于提高国家公共安全、保护人民的生命财产安全具有重要的理论价值和实际应用价值。

第2章 探测诊断技术

2.1 堤防病害地球物理特征

在堤防病害的发生与发展过程中,其物性参数即地球物理特征也在不断变化。造成堤防地球物理特征变化的因素主要包括堤身材料含水量变化,堤身结构受到破坏,出现裂缝、孔洞及外界温度影响等。

软弱层硬度小,易液化,岩土物性资料和市场结果表明,大堤土抗剪强度及抗液化能力与其弹性波速有相关关系,为以弹性波为基础的物探方法提供了良好的物理前提;老口门软弱层孔隙度大,含水量高,一般表现为相对低阻,可采用以电阻率为基础的物探方法测试堤身各层视电阻率圈定其分布范围。

堤身主要为砂壤土和粉质黏土,堤身电阻率变化不大,宏观上可认为均质体,裂缝部位与无裂缝的堤段之间存在明显电性差异,为高密度电法和地质雷达提供了良好的物理前提。

堤防洞穴的球形物理模型可近似为匀质背景中的空洞,洞穴中的介质为空气,物性差异较大,具体表现为密度、电阻率、波速等物性参数。高密度电法观测精度较高,数据采集可靠,对地电结构具有一定成像功能,获得地质信息丰富,是堤防洞穴探测的主要方法。

2.2 瞬变电磁法

2.2.1 方法简介及发展现状

瞬变电磁法也称时间域电磁法(Time-Domain Electromagnetic Methods,简称TEM),它是以地下介质之间的导电性和导磁性差异为物理基础,利用不接地回线(磁性源)或接地导线(电性源)向地下发送一次脉冲电磁场(一次场),在其激发下,地下地质体中激励起的感应涡流将产生随时间变化的感应电磁场(二次场)。由于二次场包含有地下地质体丰富的地电信息,在一次脉冲磁场的间歇期间,利用线圈或接地电极观测二次场(或称响应),通过对这些响应信息的提取或分析,从而达到探测地下地质体的目的。

在1933年,美国科学家L. W. Blum最早提出利用电流脉冲激发供电偶极形成时间域电磁场,采用电偶极测量电场,并命名为Eltran法,于当年获得美国发明专利。该方法提出后,美国石油公司做了很多野外试验,希望得到类似地震反射法的结果,但由于脉冲激发的瞬变电磁响应频率较低,在沉积盆地难以得到能识别的分辨率,使得Eltran法的幻想破灭。

在苏联,早在1937年,ARKraev就提出了瞬变电磁测深法。20世纪50年代,苏联基本建立了瞬变电磁法解释理论与野外施工的方法技术,20世纪60年代成功地发现了奥伦堡地轴上的大油田。苏联在瞬变电磁法理论研究方面一直走在世界前列,在20世纪50~60年代,由И. И. Бахбур, А. А. Кырмашин等成功地完成了瞬变电磁法的一维正、反演。在20世纪70~80年代,苏联地球物理工作者又在二、三维正演方面做了大量工作。在20世纪80年代初,苏联学者提出了电磁波拟地震波的偏移方法,他吸取了“偏移成像”的广义概念,在电磁法中确定了正则偏移和解析偏移两种方法。在20世纪80年代末,KameHecKHH等又从激发极化现象理论出发,研究了时间域瞬变电磁法的激电效应特征及影响,成功地解释了瞬变电磁法晚期段电磁响应的变号现象。由俄罗斯生产的大功率瞬变电磁仪器已进入我国市场。

在西方,1951年首先由J. R. Wait提出了利用瞬变电磁场法寻找导电矿体的概念,但大规模发展该方法始于20世纪70年代。J. R. Wait, G. V. Keller, A. A. Kaufman等对该方法的一维正、反演及方法技术进行了大量研究。20世纪80年代以来,随着计算机技术的发展,西方各国在瞬变电磁法的二、三维正演模拟方面做了大量工作,代表性人物有G. W. Hohmann, P. Weidelt, G. F. West, A. P. Raiche, B. R. Spies, J. H. Knight, SanFilippo, T. J. Lee等。理论研究方面的代表性著作有A. A. Kaufman和G. V. Keller的专著《频率域和时间域电磁测深》及M. N. Nabighian主编的《应用地球物理学中的电磁方法》等。地面瞬变电磁法仪器主要有加拿大Geonics公司的PROTEM系统(包括PROTEM47、PROTEM57-MK2、PROTEM67等系列),加拿大CRONE公司的DigitalPEM系统,澳大利亚CSIRO公司的SIROTEM-II、SIROTEM-III以及美国Zonge公司的GDP-32II多功能电磁法仪,加拿大Phoenix公司的V-5、V-6A、V8多功能电测站等。

我国对TEM的研究始于20世纪70年代,长春地质学院、地矿部物化探研究所、中南工业大学、西安地质学院、中国有色金属工业总公司矿产地质研究院、煤炭科学研究总院西安分院及中国地质大学等单位分别在方法理论、仪器及野外试验方面做了一定的工作,取得了一系列效果好的应用实例。从20世纪90年代至今,在国内,TEM进入了蓬勃发展和广泛的应用阶段。由于短偏移距TEM能够实现频率域方法中无法实现的近区勘探,特别是能解决中心探头装置不存在记录点的问题,且有极高的工作效率,因此在中、深层水文地质勘探中,TEM已成为主要的勘探方法。近年来,随着探测深度的增加,长偏移距瞬变电磁测深法(LOTEM)的应用日益增多,同时,由于浅层工程地质勘探的需要,又促进了浅层FASTEM的发展。总的来看,目前国内已比较完整地建立了TEM的一维正、反演及方法技术理论,并自行研制了一些功率较小的仪器,主要有长沙智通新技术研究所研制的SD-1型和SD-2型瞬变电磁仪、地矿部物化探研究所研制的WDC-2型系统、西安物探研究所研制的EMRS-2型系统以及北京矿产地质研究院研制的TEMS-3S型瞬变电磁仪等。但无论是方法理论研究还是仪器研制,均落后于世界先进水平,特别是在仪器研制方面,除少数有所独创外,大多是在国外仪器的基础上开发改进的,一流的大功率、多功能瞬变电磁仪目前仍然依赖进口。