

中国堤防工程施工丛书

ZHONGGUO
DIFANG GONGCHENG
SHIGONG
CONGSHU

2

堤防工程探测、监测与检测

龚壁建 周力峰 董建军 陈彦生 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

中国堤防工程施工丛书

ZHONGGUO

DIFANG GONGCHENG

SHIGONG

CONGSHU

2

堤防工程探测、监测与检测

龚壁建 周力峰 董建军 陈彦生 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系《中国堤防工程施工丛书》之一,主要介绍了堤防隐患探测、安全监测与检测、施工质量检查和堤防工程质量检测体系。并通过对重点堤防的隐患探测、安全监测与质量检测,利用积累的大量工程实例,来说明堤防工程探测、监测与检测的重要意义。同时还介绍了堤防工程探测、监测与检测新技术。

本书可供水利水电、土木工程、地基处理、公路交通、冶金矿山、石油化工的设计、科研、监理、生产与管理方面的人员以及中职、中专和高等院校的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

堤防工程探测、监测与检测/龚壁建等编著. —北京:
中国水利水电出版社, 2005
(中国堤防工程施工丛书; 2)
ISBN 7-5084-3214-2

I. 堤... II. 龚... III. ①堤防—防洪工程—探测
②堤防—防洪工程—监督管理③堤防—防洪工程—检测
IV. TV871

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 099136 号

书 名	中国堤防工程施工丛书·2 堤防工程探测、监测与检测
作 者	龚壁建 周力峰 董建军 陈彦生 编著
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: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	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	北京市兴怀印刷厂
规 格	850mm×1168mm 32 开本 10.75 印张 289 千字
版 次	2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	29.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

编 著 者 的 话

沿江、河、湖、海的岸边修建的挡水建筑物称为堤；构建在河谷或河流中拦截水流的水工建筑物称为坝。“防水的堤坝”合称为“堤防”（《辞海》1999年版缩印本第668页）。

目前，中国堤防总长近30万km，其中江、河、湖堤长达27万余km，海堤1万余km；大、中、小型库坝8.5万座，总库容5184亿 m^3 ；蓄滞洪区近百处，总容积980亿 m^3 。这些数量均名列世界前茅。

1998年大水以后，在中央积极财政政策的支持下，堤防建设进度加快，长江、黄河、淮河、海河、松花江、辽河和珠江等七大流域以堤防为重点的防洪体系进一步完善，堤防建设标准普遍提高，抗御大洪水的能力增强。到2000年，新建与加固堤防已长达7400km，流域干、支流Ⅰ、Ⅱ级重要堤防达标1.02万km；海堤达标6000km；全国有236座城市达到国家防洪标准。所有这些成果的取得，离不开采用“新材料、新技术和新工艺”的历史性突破。《中国堤防工程施工丛书》正是“三新”应用的总结与理论的升华。

丛书分四篇十八册，即总论篇的《堤防工程施工工法概论》、《堤防工程探测、监测与检测》；护岸工程篇的《抛石法》、《沉排法》、《柴枕法》、《板桩法》、《模袋法》和《吹填法》；防渗工程篇的《深搅法》、《高喷法》、《注浆法》、《射水法》、《抓斗法》、《切槽法》、《振动沉模板法》和《土工合成材料法》；补强篇的《化灌法》、《抗碳化法》。

各册分别介绍了各工法的定义、适用范围、工法原理、施工

科技与设备、施工工艺及流程、施工质量控制与检收标准、工程应用典型案例。书前汇集了相应术语与符号；书末附有相关的施工用表、规范与设备细目。丛书内容简明扼要，通俗易懂，集知识性、实用性和可操作性于一体，实为当代堤防工程施工工法大全。

“科学有无止境的前沿”，“技术有不停滞的进步”。我们深信，编撰并出版《中国堤防工程施工丛书》，无疑有着十分重要的意义。分册的陆续问世，将有助于相关学科领域和企业单位获得更高、更深与更多的创新与发展。

2005年5月

前言

工程实践和理论研究告诉我们，理论、经验与监测相结合，是指导堤防工程设计、施工与管理的正确途径。

对于中国七大流域、三大湖泊等 27.37 万 km 的堤防，无论从工程角度，还是从环境角度，尤其是从坚持科学发展观、创建健康河流与人水和谐的新理念视野来看，仅从理论上进行模拟，难以获得定量分析；光从经验上进行类比，也难以获得合适借鉴。只有通过对重点堤防的隐患探测、安全监测与质量检测，利用积累的大量工程实例以及水力学、土力学、环境工程学、人文社会学、地球物理学、无损检测、自动化、无线电遥测、控制论和数理分析等理论相结合，才会使堤防“生命”起到“统合综效”作用，最终达到平安度汛、人水和谐、生态环保的目的。

强调堤防工程探测、监测与检测的重要意义，其理由有四点：

首先，靠堤防探测及人工现场巡查，可及时提供隐患信息，为直接预报可能发生或即将发生的险情、制定相应的对策创造了条件。

第二，靠堤防安全监测与检测，可将其动态信息及时反馈来指导现场施工，为变更施工工艺与流程、修改设计方案、降低工程造价提供依据。

第三，对堤防实施探测、监测与检测，可及时掌控周围环境：天象气候变化、地下土层隐患、水流河势迁移等四维时空变迁，推测其堤防防洪能力的考量，为调度洪水、平夷险情奠定基础。

第四，探测、监测与检测的另外一个重点，是探索人类生态环境在堤防“夹持”下，河水水质、地下水污染、水生物与微生物生存极限、沿岸植被发育程度、“以人为本”的生活与生命洪水威胁承载力规律等，成为当今堤防由“工程”型转变为“资源”型轨道的“关节点”。

总之，堤防工程探测、监测与检测，既是一个维系人类与水资源的研究课题，又是一个在防洪抢险非常情况下能否做到适时预警预报并紧急预案应对的系统工程。在当前市场经济中，还是一个竞争颇为激烈的修补加固的施工项目。

1998年大洪水后，国家和地方政府投入了近千亿元资金对重点堤防尤其是隐蔽工程进行了整治。既采用了传统施工工法，又采纳了许多原本在其他领域的新技术、新材料和新工艺，在中国堤防岸坡保护、堤身堤基防渗加固以及堤防和穿堤建筑物修补能力方面，迈上了新的一个平台。

与此同时，以科研、高等院校及仪器制造厂为代表的一批探测、监测与检测人员，纷纷走出实验室与厂房，频频出现在监测等现场，对中国数万 km 的重点堤防险段进行了实时检测。其中，以长江流域为例，自湖北荆州至安徽马鞍山的千余里干堤内，长江科学院工程安全与病害防治研究所就预埋了渗压计、孔隙水压力计、测缝计、钢筋计、位错计和土压力计等千余件传感仪表，并持续不断地现场实时监测上报，依靠科学技术为长江堤防安全保驾护航。从2002年8~9月历史少见的秋汛与1998年6~8月闻名于世的大洪水相比较，曾经是百万军民防洪抢险的局面不复出现了，如今是“海晏河清，国泰民安”。其中，堤防工程的探测、监测与检测功不可没。

正因如此，为了及时总结近几年的堤防工程探测、监测与检测经验，向体系化道路前进一步，并企盼在其理论构建、方法优化和信息反馈诸方面有所作为，《中国堤防工程施工丛书》·2：《堤防工程探测、监测与检测》一书面世，以达“抛砖引玉”的目的。

本书采取集体讨论、分工负责方式进行编著。前言、绪论、堤防隐患探测和附录由龚壁建执笔；堤防安全监测、堤防安全检测、穿堤建筑物监控与检查、堤防工程质量检测和本书适用标准共5章由周力峰执笔；董建军、陈彦生和饶勇参加了第2章至第6章的部分章节的编写。全书由董建军策划、陈彦生统稿。

在本书编著过程中，引用了长江水利委员会、黄河水利委员会、淮河水利委员会、海河水利委员会、松辽水利委员会、珠江水利委员会、中国水利水电科学研究院、长江科学院、南京水利科学研究所、河海大学、武汉大学、中南大学、山东水利科学研究所、山东黄河河务局、河南黄河河务局、湖北省水利厅、湖南省水利厅、安徽省水利厅、江西省水利科学研究所等单位有关信息资料，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中不当之处，恳请读者不吝指正。

编著者

2005年10月

术 语 表

探测：指对堤防性状进行试探性的调查。又称“探赜索隐”，即探查幽深莫测的隐患，如隐秘难见的洞穴、松软层、裂缝和渗漏等，通常是对堤防工程修建运行后的一种回顾性调查。

监测：指对堤防工程施工状况或堤防运行性状进行实时监视测量的过程，一般需要持续一段时间，以获得数据或参数的历时变化过程。通常在堤防工程施工过程或运行过程中进行。

检测：指根据某种规则对堤防工程的性状进行检验并判断堤防的状况，通常在某项工程施工完成后进行。

时间域电磁法：即时间域瞬变电磁探测法，采用转换器向地下发送脉冲电磁波，同时感应地下电介质产生的瞬变感应涡流，以时间函数来表示测量结果的一种勘探方法。

自然电场法：相对于人工电场法，指在不施加人工电场的条件下，通过探测地下电介质体的自然电位分布，以了解堤防地质状况的一种电学勘探方法。

电阻率法：在本书中指电测深法、电剖面法和高密度电法。

电测深法：指在同一点上逐次扩大电极距使探测深度逐渐加深，观测测点处垂直方向由浅到深的电阻率变化，并依据地下目的层与相邻层的电阻率差异来探测地下介质分布的一种电学勘探方法。

电剖面法：指保持装置的极距不变，沿测线观测大地电阻率沿水平方向变化，依据地下目的体诸如裂缝、异物等与周边介质的电阻率差异，以探测地下某一深度范围内地质情况的一种电学勘探方法。

高密度电法：指原理上属于电阻率法的范畴，是电测深与电剖面的组合，其观测点密度高，可较详细探测水平和垂直方向上的电性变化的一种电学勘探方法。

探地雷达法：指利用电磁波的传播和反射原理，使用探地雷达仪器向地下发射具有一定频率的超高频脉冲电磁波，通过接收反射波，识别地层介质电性差异，进行探测的一种勘探方法。

同位素示踪法：指使用人工放射性同位素（如 ^{131}I 、 ^{182}I 、 ^{85}Br 等）

标记水流流场中的水流质点，示踪显示，调查水流速度或去向的一种测量方法。

瑞利波法：指由于电磁波具有沿深度频散的特点，利用瑞利波在分层介质中的传播特性进行地质探测的一种勘探方法。

弹性波测试：指利用弹性波的运动学和动力学原理对岩土或混凝土进行波速测试以探测内部性状的一种探测方法。

层析成像 (CT)：指利用弹性波或电磁波的透射原理，对被测区域进行多断面扫描，根据对波速和能量吸收的分析，重建图像的一种探测方法。

水声勘探：指利用声波的传播和反射原理探测水底地形地貌、水下地层性状的一种勘探方法，又称水下浅地层剖面勘探。

测试系统：指由一个或若干个功能单元所组成的测量与试验系统的总称。

测试系统的精度与误差：指测试系统的测量示值和被测量的真值的接近程度。

精度与误差是同一概念的两种不同表示方法。通常测试系统的精度越高，其误差就越低，反之亦然。

测量系统的稳定性：指测量系统在受到环境、温度、时间变化后，测量值保持额定工作特性的能力。有时也称为稳定度或不稳定性。

测量范围：指测量系统的测量上限值和测量下限值所确定的被测量范围。

灵敏度：指测量系统的测量示值变化量与相应被测量的变化值之比。对于线性系统，其灵敏度为常数，即 const. 。

分辨率：指测量系统可能检测到的被测量的最小变化值，亦称“灵敏阈”。

线性度：指标定曲线与理想直线的接近程度，亦称“直线度”。

准确度：指表示测试系统所获得的测量结果与真值的一致程度，并反映出测量中各类误差的综合。一般而言，准确度越高，测量结果中所包含的系统误差与随机误差就越小，相应该测试仪表价格就越昂贵。

系统误差：指测量示值由固定因素影响而产生的带有规律性的误差。

随机误差：指测量示值由偶然因素影响而产生的，其数值大小和方向不固定的误差。一般而言，测量中随机误差总体上服从正态分布。

测量平差：指测量中按最优原理处理各种观测结果的理论和计算方法。其目的在于消除观测值间的矛盾以求得最可靠的结果，并评定测量结果的

精度。在测量中，只要有多次余观测，就有平差。通常按统计学原理进行测量平差处理（包括参数平差、条件平差、附条件参数平差与附参数条件平差等）。

回程误差：指测量仪器在被测输入量由小增大和由大减小的行程中，对应同一输入值所得到的两个输出值之间的最大差值（ $h_{\max}$ ）与满量程值（A）的比值的百分率，即

$$\delta_h = \frac{h_{\max}}{A} \times 100\%$$

回程误差是由迟滞现象和测量系统的非工作区（即死区）引起的，故又称“迟滞性”。

非电量的电测法：指把被测物理量（诸如位移、速度、压力、变形、应变、流量、应力等），通过“传感器”转换为电量（诸如电阻、电容、电压、电流等）再进行测量的方法。

传递特性：指测量系统输入与输出对应关系的特性。

面波：指质点运动轨迹为椭圆形的波，如瑞利波（John William Rayleigh Wave）等。

剪切波/横波/S波：指波的传播方向与介质质点的振动方向垂直的波。

压缩波/纵波/P波/疏密波：指波的传播方向与介质质点的振动方向一致的波。

面波速度/瑞利波波速：指面波/瑞利波在介质中传播的平均相速度，单位为 m/s。

剪切波/横波/S波层速度：指剪切波/横波/S波在地层中的传播速度，单位为 m/s。

压缩波/纵波/P波/疏密度层速度：指压缩波/纵波/P波/疏密度在地层中的传播速度，单位为 m/s。

瞬态：指瞬间状态，它是时间暂短的一种非定常状态，在分析非定常状态时如震源等常需要取瞬间状态分析。

排列：指为了完成一个面波采集记录，布置在一条测线上接收震动信号的检波器组合。

偏移距：指在进行面波采集时，震源与测量仪器第一通道所连接的检波器之间的距离，单位为 m。

道间距：指在排列中，相邻检波器之间的距离，单位为 m。

多道：指测量仪器具有多个被测量信号输入通道，能同时记录和输出

形成完整记录体系。

基阶面波：指面波的多个传播模态中以第一阶振型传播的波动称为基阶面波。

频散：指在层状介质中面波的传播速度 (V_R) 随频率 (f) 变化的特征叫频散。频散是频率 (f) 或波长 (λ) 的函数。

面波频散：指面波各频率组分具有不同的传播速度的现象。

基阶面波频散：指基阶面波传播模态波动的频散规律。

相速度：指单一频率组分量波的同一相位的传播速度，单位为 m/s 。

群速度：指同一震源产生不同频率的面波按各自的相速度传播时，相互干扰形成的波组的传播速度，单位为 m/s 。

地球物理勘探：亦称“物探”。指用地球物理学原理和方法研究地壳中地质构造及地壳深部构造，以及勘查矿产资源和解决工程的水文地质等问题的应用科学。包括磁法勘探、重力勘探、电法勘探、地震勘探、地温场勘探和放射性勘探等。

磁法勘探：指以下岩石和矿物具有不同的磁性而引起地磁场强度变化（或称“磁力异常”）为基础，通过对分布在地表附近磁力异常，来间接地探明地质构造确定带有磁性的地质体的空间位置与几何形状的一种地球物理方法。包括地面磁测、航空磁测、海洋磁测和井中磁测等。

重力勘探：指以地下岩石、矿物的密度差异引起地表地球重力加速度的变化为基础，通过对地表附近（包括空中、地面和海面）重力异常的测量和分析，来研究地壳运动及其均衡状态、地壳厚度变化、圈定盆地边界、寻找金属矿床和储油结构的一种地球物理勘探方法。

电法勘探：指以地壳中各种岩石、矿物的电学性质差异为基础，通过探测和研究由天然或人工建立的电场或电磁场空间与时间分布规律，来调查地质构造和地壳深部构造、寻找矿产以及解决水文地质、工程地质等问题的一种地球物理勘探方法。包括以场的电学性质划分的直流电法、电磁感应法、激发极化法与大地电磁探测法等；或以空间分布的地面电法、航空电法、海洋电法及地下电法等。

地震勘探：指以地下介质弹性、密度的差异为基础，通过观测和分析计算人工激发产生的地震波到达观测点的时间与强度之特性，了解地下岩（土）层的分层结构、深度、岩（土）性变化和地震波速度的一种地球物理方法。包括反射波法与折射波法。

地温场勘探：指以地壳中岩石、矿物的热学性质为基础，通过观测地

球内部各种热源所形成的地球温度场的分布及变化规律，以勘测地热资源或解决水文地质、工程地质等地质问题的一种地球物理方法。

放射性勘探：指利用核物理学的方法与技术，探测和研究地球介质中天然或人工的放射性射线的强度及其分布规律，从而发现放射性矿床及解决与石油、天然气、地下水和堤坎工程有关的地质构造以及对环境污染的监测等的一种地球物理方法。包括天然放射性勘探与人工放射性勘探两种。

放射性测井：指测量钻孔剖面岩石的天然放射性射线强度或测量经过放射源照射后岩石所产生的次生放射性射线强度的一种测井方法。亦称“核测井”。用以探查放射性矿床；确定岩石成分；计算岩层的地质和物性参数；判断气层等。包括伽玛测井、伽玛—伽玛测井、中子测井和中子寿命测井等。其特点是不受温度、压力、化学性质等因素影响；可在下套管的钻孔中进行。

地震层析成像：指利用地震波在地质体中传播时走时及幅值的变化，通过 Radon 变换经计算机处理重建地质体内部的结构图像。亦称“地震 CT”。

地震测井：指在井中直接测量地震波传播速度的测井方法。

..... 符 号 表

统计学类参数

K : 极差系数
 M : 总均方相对误差
 m : 均方相对误差
 Δ : 绝对误差
 $\bar{\Delta}$: 平均绝对误差
 δ : 相对误差, 放射性统计涨落相对标准误差
 $\bar{\delta}$: 平均相对误差
 σ : 放射性统计涨落标准误差

电磁学类参数

D_s : 激发极化视衰减系数
 E_x, E_y : 水平方向电场
 f : 电磁波的频率
 H_x, H_y : 水平方向磁场
 I : 电流强度
 I_s : 视激发比
 K : 电法装置系数
 S_{05} : 激发极化半衰时
 S_t : 纵向电导
 U : 电位
 V : 电磁波波速
 β : 介质对电磁波能量的吸收系数
 ΔU : 电位差
 ΔU_1 : 一次场电位差
 ΔU_2 : 二次场电位差
 ΔU_g : 干扰电位差
 ϵ : 介电常数

η : 激发极化视极化率

λ : 电磁波波长

μ : 磁导率

ρ : 电阻率

ρ_s : 直流电法视电阻率

ρ_T : 频率域电磁法 (TM) 视电阻率

ρ_r : 时间域电磁法 (TEM) 视电阻率

σ : 电导率

ω : 角频率

物理学类参数

A : 振幅

E_d : 动弹性模量

E_s : 静弹性模量

f : 波的频率

G_d : 动剪切模量

G_s : 静剪切模量

K : 反射系数、率定系数

K_0 : 单位弹性抗力系数

K_w : 岩体风化系数

K_v : 岩体完整性系数

V : 波速、质点振速

V_p : 纵波速度

V_R : 瑞利波速度

V_s : 横波速度

λ : 波长

μ : 泊松比

φ : 夹角、质点相位

ω :角频率

几何学及距离、方位参数

AB :供电电极间距

$AB/2$:1/2 供电电极间距

d :距离、收发距

H :高程、收发距

h :厚度、埋深

L :瞬变电磁线框边长

MN :测量电极间距

$MN/2$:1/2 测量电极间距

OA :相对于测量点 O 的正供电
电极距

OB :相对于测量点 O 的负供电
电极距

OC :相对于测量点 O 的无穷远
供电电极距

R :自然电位等位圈最大伸长
距离

S_R :瞬变电磁线框面积

x :测点间距

α :方位角

ΔR :自然电位相邻等位圈位移
增量

时间参数

T :时间、周期

t :时间间隔

t_s :瞬变电磁的视时间常数

其他参数

n :孔隙度

T :温度

η :各向异性系数

ρ :密度

【 目 录 】

编著者的话

前 言

术语表

符号表

1 绪论	1
1.0 引言	1
1.1 问题的提出	2
1.2 发展简史	10
1.3 发展趋势	15
2 堤防隐患探测	17
2.0 引言	17
2.1 主要探测方法原理	22
2.2 时间域电磁法	37
2.3 自然电场法	44
2.4 电阻率法	51
2.5 探地雷达法	64
2.6 放射性同位素示踪法	82
2.7 测温法	89
2.8 瞬变面波法	104
2.9 工程应用典型案例	115
3 堤防安全监测	151
3.0 引言	151
3.1 堤防安全监测仪器设备及选配依据	156
3.2 堤防安全监测重点	158
3.3 堤防安全监测典型案例	172

4 堤防安全检测	185
4.0 引言	185
4.1 堤防运行性状检测	187
4.2 堤防安全检测的理论分析	214
4.3 堤防安全检测的水下及深部钻孔典型设备	218
5 穿堤建筑物监控与检查	223
5.0 引言	223
5.1 堤防永久设备安全监控与检查	226
5.2 穿堤建筑物混凝土安全检测	233
5.3 城市防洪墙钢闸板性能测试	237
6 堤防工程质量检测	241
6.0 引言	241
6.1 堤防工程质量检测分类	243
6.2 堤防防渗墙质量检测方法与仪器设备	250
6.3 堤防工程质量评价	255
6.4 堤防工程质量检测典型案例	260
7 本书适用技术标准	283
附录	286
附录 A 物性参数表	286
附录 B 中国波级分类表	289
附录 C 泥浆原料粘土、膨润土和外加剂的性能要求	289
附录 D 岩土渗透性分级	291
附录 E 探测基本公式及计算图表	292
附录 F 测试表格	309
附录 G 放射工作卫生防护管理办法	311
参考文献	318