

# 分准入沂松散复杂堤防隐患探测技术研究

高山<sup>1</sup>, 孙超君<sup>2</sup>, 邓社根<sup>3</sup>, 徐荣<sup>3</sup>

(1. 江苏省水利工程建设局, 江苏 南京 210029; 2. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210022; 3. 江苏省工程勘测研究院有限责任公司, 江苏 扬州 225000)

**摘要:** 为确保分准入沂堤防运行安全, 对堤防进行隐患探测, 但由于该段堤防地质结构复杂, 探测干扰源多, 探测难度大。本工程在试验段进行了5种不同物探方法探测, 根据探测成果, 研究分析各种物探方法在复杂堤防隐患探测工作中的适用性和局限性, 并采用静力触探法结合钻孔取土、土工试验和注水试验对探测成果进行综合验证。通过研究分析创新性地提出了一套经济实用、高效准确的针对复杂堤防隐患的综合物探技术, 并对全线堤防成功进行探测, 获得良好的应用效果。该成果的提出为工程全线探测作业提供了指导性成果, 并为以后类似复杂堤防隐患探测工作提供可借鉴的经验。

**关键词:** 堤防隐患; 探地雷达法; 高密度地震映像法; 瑞雷面波法; 静力触探

**中图分类号:** TV543      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1007-7839 (2018) 05-0011-07

## Research on Huai-Shu River hidden trouble detection technology of loose and complex dyke

GAO Shan<sup>1</sup>, SUN Chaojun<sup>2</sup>, DENG Shegen<sup>3</sup>, XU Rong<sup>3</sup>

(1. *Water Conservancy Project Construction Bureau of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu*;  
2. *Management Division of Qinhuai River Hydraulic Engineering of Jiangsu Province, Nanjing 210022, Jiangsu*;  
3. *Jiangsu Engineering Surveying Institute Co. Ltd, Yangzhou 225000, Jiangsu*)

**Abstract:** To ensure the safe operation of the Huai-Shu River dike, detection of hidden danger for levees. However, because of the complex geological structure of the dike, the detection of interference sources is many, and the detection is difficult. The project in the test section were detected in five different geophysical methods, according to the detection results, the analysis of various geophysical methods in applicability and limitations in detecting complex and the embankment hidden danger, method combined with drilling soil, soil test and injection test of comprehensive verification of the detection results. Through the research and analysis, a set of comprehensive geophysical technology is put forward, which is economical, practical, efficient and accurate for the hidden danger of complex dykes. The success of the whole line levee is detected and good application results are obtained. The results provide the guiding results for the whole engineering line detection operation, and provide useful experience for similar complex dyke detection work in the future.

**Key words:** dike hidden danger; Ground penetrating radar method; High density seismic image method; Rayleigh wave method; Static cone penetration

收稿日期: 2018-03-15

作者简介: 高山(1978-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事建设管理工作。

## 1 概况

### 1.1 工程概况

分淮入沂工程始建于20世纪50年代初,是淮河下游防洪工程体系的重要组成部分,洪泽湖排洪通道之一,亦是淮河和沂沭泗流域相互调度综合利用的一项多功能工程<sup>[1]</sup>。工程自洪泽湖边的二河闸起,沿线经淮安市的清浦、淮安区和宿迁市的泗阳、沭阳县,至沭阳西关与新沂河交汇处,全长97.5 km,设计行洪流量3000 m<sup>3</sup>/s。二河东堤及淮沭河东堤、接口段东西堤为1级堤防;二河西堤头堡~淮阴闸段、淮沭河西堤为2级堤防。河道自南向北沿程穿越废黄河、中运河、总六塘河、柴米河,两岸保护面积8600 km<sup>2</sup>,耕地45.87万 hm<sup>2</sup>,人口538万。

根据历次地质勘察资料,分淮入沂沿线堤防码头镇~淮阴闸段堤身堆土为弱透水性,淮阴闸~沭阳闸东西堤防大部分堤段的堤身堆筑较差,渗漏严重,为中等透水性,局部堤段甚至达到强透水性<sup>[2]</sup>。2013年在对迎水坡堤脚进行防渗墙施工时发现局部地段在开挖回填压实后发现原挖开的土量不足,说明这些地段原来填土层结构整体较为松散,密实度不够。2015年对堤防进行现场探查,发现堤防沿线存在一些空洞,主要位于淮沭河东堤47+000~51+000,洞口直径0.1~0.4 m,深度0.3~0.8 m,推测主要为动物的洞穴,另外沿线堤顶防汛道路凹凸不平、损坏严重,除年久失修外,亦与堤身堆土不密实、不均匀沉陷有关<sup>[3]</sup>。

### 1.2 探测难点

千里之堤溃于蚁穴。根据综合地质调查结果,分淮入沂堤防隐患和松散体基本上分布在水位面以上的堤坝迎水面填筑层中,这些问题的存在会导致淮沭河堤防极易发生流土、管涌、坍塌等破坏,汛期峰期有可能造成溃堤等重大安全问题。因此,2012年经国家发展与改革委员会批准,对淮沭河沿线,特别是对堤身达到中等透水性及以上的淮阴闸~沭阳闸东西堤防可能导致地质病害的堤防隐患进行探测,掌握堤防质量状况,并进行必要的加固处理,保证堤防安全。但由于地质条件的复杂性及工程的隐蔽性,堤防隐患探测比较困难,且分淮入沂堤防地质条件复杂,堤身土以砂性土为主,间断分布软弱粘性土,土质结构松散;堤身内部存在较多隐患,隐患大小不一,隐患位置分布

不规律;正常河水位较低,地下水位较低,而在应急行洪时河水位较高;堤防全线长度较长,堤身内存在垂直铺膜等防渗体系,探测时干扰源较多。如何快速、准确的探测堤防工程存在的隐患问题,是一个难题。鉴于此情况,针对工程实际情况,研究提出了一套经济实用、高效准确的复杂堤防隐患综合物探技术,并对全线进行探测。

## 2 探测技术研究

目前,堤防隐患的探测方法主要有地质钻探、人工探视和地球物理勘探3种。前2种方法具有局限性,且对堤防有破坏,成本高,既费力且效果有限,不能满足快捷、准确和无损等要求,难以适应于较大堤防工程的探测<sup>[4]</sup>。常用的地球物理勘探技术有多种,如探地雷达法、地震反射波法、高密度地震映像法、瑞雷面波法、大地电导率法、高密度电阻率法等<sup>[5]</sup>。在复杂堤防隐患探测中,每种物探方法都有各自的适用性及其优缺点,且采用单一物探方法探测对堤防隐患的判别有可能形成多解,很难做出准确的判断。本工程在全线堤防隐患探测工作开展之前,以淮沭河西堤15+440~16+440为试验段,采用各种物探方法分别进行隐患探测并对比分析探测成果,通过对比研究,寻找出一套经济实用、高效准确的针对分淮入沂松散复杂堤防的隐患综合物探技术。

### 2.1 探测布置

在堤顶路面两侧各布置一条顺堤方向的测线,每条测线长度1000 m,如图1所示,分别采用了探地雷达法、地震反射波法、瑞雷面波法、高密度地震映像法和大地电导率法5种物探方法沿布置的测线对堤防进行隐患探测,并对比分析探测成果。



图1 试验段堤防物探测线布置示意图

### 2.2 探测过程

选取试验段右测线16+140~16+340段堤防分别就上述5种探测技术的实施方法和应用成果进行对比验证研究,见图2。

#### 2.2.1 探地雷达法

对试验段堤防采用探地雷达法进行全线布查,分别沿堤顶迎水坡侧(右测线)和背水坡侧(左测线)2条测线进行。外业数据采集系统采用美国超强地面耦合系统(SIR-20),观测方式为沿测线连续测量,天线移动速率约0.4 m/s。为消除天线探查速度不均对测量位置的影响,天线沿剖面每隔5 m按动标记开关,以便准确控制探查剖面位置。扫描数、采样频率、记录长度等技术参数根据现场试验取得。

探测结果表明,探地雷达法探测水平和横向分辨率均较高,深度能够满足复杂堤防隐患探测的要求,能较准确对堤防结构层进行划分,特别是对人工填土层内出现的富水、裂缝、软弱、松散和空洞异常有良好的探测效果,根据雷达反射波的波形显示特征,能探测到土体异常点。

### 2.2.2 地震反射波法

在试验段堤防采用地震反射波法进行隐患探测,采用多次覆盖技术,地震仪采用美国 Geometrics 公司生产的 StratiVisor NZ-XP 型数字地震仪;震源采用24磅大锤锤击铁板方式,接收采用28 Hz 横波检波器;采用技术参数为道间距1 m,排列长度24 m,炮间距3 m,偏移距12 m,采样率1 ms,记录长度512 ms。

探测结果表明,地震反射波法对复杂堤防的主要结构层的探测效果较好,能清晰的反映出堤防填土层和自然沉积层的分层界面,以及自然沉积层内的不同物性地层的分层界面。

### 2.2.3 高密度地震映像法

在试验段堤防采用高密度地震映像法进行隐患探测,采用美国 Geometrics 公司生产的 StratiVisor NZ-XP 型数字地震仪,震源采用24磅大锤锤击铁板方式,接收采用28 Hz 纵波检波器。观测采用小偏移距单道接收技术,布设观测点间距为1 m,炮检偏移距4.0 m,锤击震源,采样时间2 ms,数据采集时采用全通模式。

探测结果表明,高密度地震映像法对堤防隐患探测有一定的效果,能探测出隐患的平面位置,特别是大范围的地层沉降或松散,探测效果比较明显。

### 2.2.4 瑞雷面波法

在试验段堤防采用瑞雷面波法进行隐患探测,采用美国 Geometrics 公司生产的 StratiVisor Geode 型数字地震仪,震源采用24磅大锤锤击方

式;接收采用2 Hz 面波检波器。外业观测采用瞬态多道面波检测技术,单边锤击排列观测装置,每个排列24道接收,道间距的选择原则: $2/3\lambda R < \text{道间距} < \lambda R$ ,检波器选用频率由探查深度式: $H=V_R/2f$ 估算,控制探测深度不大于20 m。

探测结果表明,瑞雷面波法对地层结构的划分和堤防隐患的探测均具有较好的效果,探测深度较深、不受地下水位影响,能获取地层的剪切波速度等物性参数。

### 2.2.5 大地电导率法

在试验段堤防采用大地电导率法进行隐患探测,采用加拿大生产的 EM-34 电导率仪,数据采集采用6.4 Hz 工作频率,分别用垂直偶极和水平偶极进行探测。采用垂直偶极探查方式时,线圈间距为10 m,工作频率为6.4 Hz,探查深度为15 m;采用水平偶极探查方式时,线圈间距为10 m,工作频率为6.4 Hz,探查深度为7.5 m。

探测结果表明,大地电导率法对富水区域探测效果明显,隐患含水量与周围介质相当时,探测效果不明显。

## 2.3 探测成果分析

图2为试验段堤防5种探测方法探测成果对比图。由图可知,试验段右测线16+140~16+340段堤防内隐患的中心位置主要位于16+170、16+210和16+260附近。其中,中心位置16+210的隐患相对于其他2个位置的隐患发育规模较小。

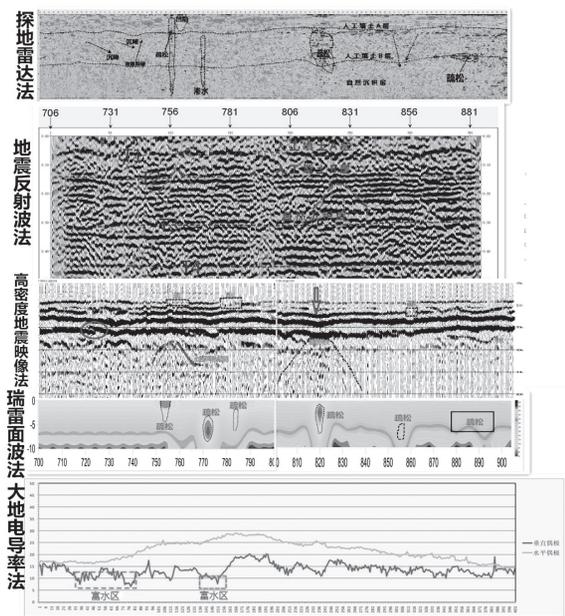


图2 试验段堤防5种探测方法探测成果对比图

探地雷达图像对这3个隐患均有明显异常反映,不仅能反映隐患的性质,还能基本反映隐患的位置、埋深和范围。地震反射波剖面图中16+170和16+260这2个位置的隐患有明显反映,表现为同相轴拱起,拱顶位置为松散体位置,但对16+210位置的隐患反映不明显。在高密度地震映像剖面图中这3个位置的隐患反映均明显,表现为结构层同相轴的下凹,波相和频率改变,下部结构层同相轴拱起。在瑞雷面波剖面图中这3个位置的隐患均反映明显,表现为红色的低波速区。在大地电导率成果曲线图中16+170和16+210这2个位置的隐患有明显反映,表现为异常低阻区,表明该段土体富水,但是对16+260位置的隐患反映不明显,可能是因为该位置的含水率较低,产生的二次场很弱。

通过对以上5种物探方法探测成果的分析,发现所探测到的堤防隐患主要是在人工填土B层(砂壤土)中。通过对比分析可以看出,探地雷达法共探测到29个异常段,基本涵盖了高密度地震映像法探测到的17个异常段和瑞雷面波法探测到的19个异常段部位。

### 3.4 各种探测技术适用性分析

试验段探测异常段如图3所示,通过对比分析研究,得到以下结论:

(1) 探地雷达探测的效果更好,其普查发现的

27个异常段基本涵盖了其它2种物探方法所发现的异常体,反映的地层结构信息和土体异常更准确,不仅能反映出土体异常的性质,而且能对异常的形态和规模进行量化,具有快速、简便、无损、准确等探测优点<sup>[6]</sup>,满足本次堤防探测的工作要求。

(2) 地震反射波法探测深度较大,对划分大深度的地层结构有良好的探测效果,但不能对堤防人工填土层中存在的富水、松散、空洞等有效探测,不满足本次堤防探测的工作精度。

(3) 高密度地震映像对地层结构、土体松散异常有明显的探测效果,但是该方法只能探测到隐患的平面位置,不能够确定隐患的埋藏深度,且使用该方法时,作业环境及人为干扰因素较大,其探测结果不能达到普查的期望效果。

(4) 瑞雷面波法对地层结构的划分和堤防隐患的探测均具有较好的效果,探测深度较深,且不受地下水位影响,适合于对地层的精细划分,获取地层的剪切波速度等物性参数,但该方法野外工作量很大,探查时间长,不宜全线使用。

(5) 大地电导率法仅对富水区有探测效果,对含水率较低的隐患探测效果较差,不满足本次堤防探测的工作要求。

## 4 验证

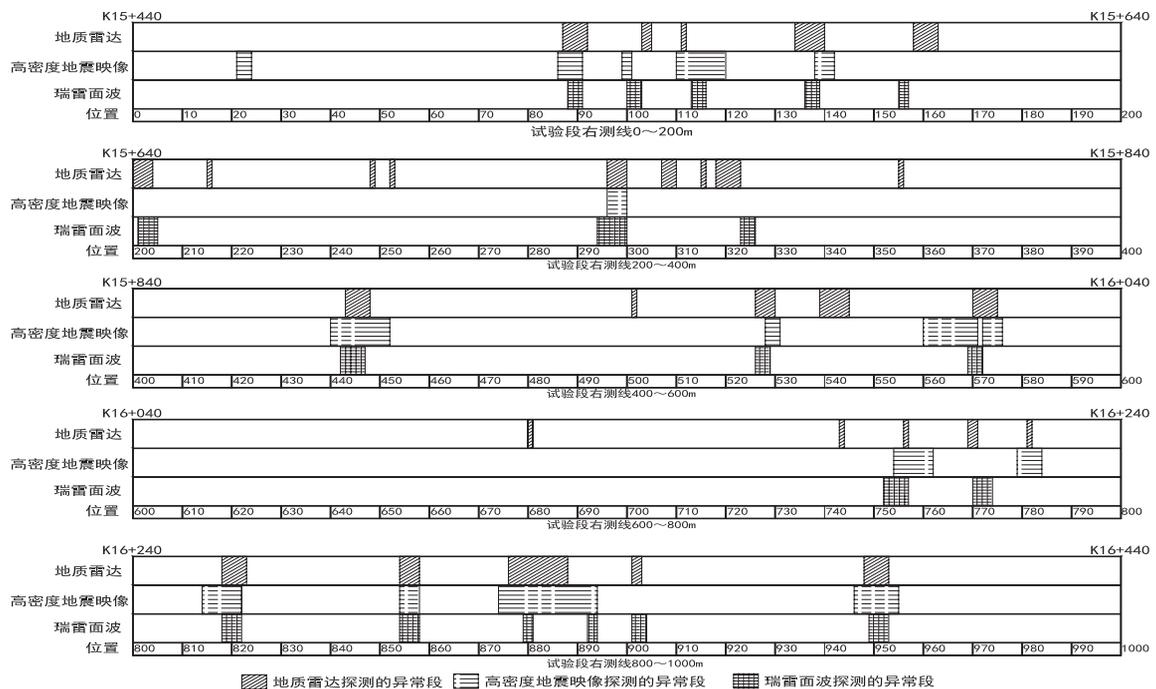


图3 试验段探测异常段平面分布图

在探测发现的异常部位中,选取右测线12个和左测线6个异常特征明显的疑似空洞体的部位进行验证,验证方法主要采用静力触探试验,并结合钻孔取土、土工试验和注水试验进行综合验证。

#### 4.1 静力触探试验

用静力触探试验对探测发现的异常部位进行

验证,具体验证布置情况及验证结果如表1所示。

#### 4.2 钻孔取土

在试验段右测线15+528异常处布置1个钻孔取土,钻探结果与物探成果一致。

#### 4.3 钻孔注水试验

在试验段右测线布置2个钻孔进行注水试验,J1位于试验段右测线15+528有隐患部位,J2

表1 静力触探及钻孔取样验证结果表

钻孔类别	孔号	钻孔位置(相对位置)	有无异常	与物探成果对应情况
静探	CZ01	左测线 15+464 (24m)	有	一致
静探	CZ02	左测线 15+564 (124m)	有	深度有差异
静探	CZ03	左测线 15+687 (247m)	有	一致
静探	CZ04	左测线 16+113 (673m)	有	一致
静探	CZ05	左测线 16+177 (737m)	有	一致
静探	CZ06	左测线 16+404 (964m)	有	一致
静探	CY01	右测线 15+530 (90m)	有	一致
静探	CY02	右测线 15+551 (111m)	有	一致
静探	CY03	右测线 15+602 (162m)	有	一致
静探	CY04	右测线 15+642 (202m)	有	一致
静探	CY05	右测线 15+761 (321m)	有	一致
静探	CY06	右测线 15+885 (445m)	有	一致
静探	CY07	右测线 16+012 (572m)	有	一致
静探	CY08	右测线 16+196 (756m)	有	一致
静探	CY09	右测线 16+261 (821m)	有	深度有差异
静探	CY10	右测线 16+320 (880m)	有	一致
静探	CY11	右测线 16+342 (902m)	有	一致
静探	CY12	右测线 16+391 (951m)	有	一致

位于试验段右测线 16+292 无隐患部位, 验证结果见表 2。对比钻孔 J1 和 J2 通过注水试验所测出的土层渗透系数, 发现 J1 的渗透系数明显比 J2 要大的多, 因此判断 J1 的注水试验试段内的土层较松散, 与物探成果一致。

#### 4.4 土工试验

根据《堤防工程设计规范》(GB 50286-2013) 第 7.2.4 条规定“2 级和堤身高度不低于 6 m 的 3 级堤防压实度值不应小于 0.93”。本次试验段位于淮沭河西堤, 属于 2 级堤防。进行室内击实试验, 成果如表 3 所示。测得试验段内 B 层的最大干密度为  $1.64 \text{ g/cm}^3$ , 则控制干密度为  $1.53 \text{ g/cm}^3$ 。

对 J1、J2 钻孔土样进行土工试验。J1 钻孔的 2 号、3 号和 4 号土样均属于 B 层, 对应的干密度为  $1.35 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.39 \text{ g/cm}^3$  和  $1.34 \text{ g/cm}^3$ , 均小于 B 层土的控制干密度  $1.53 \text{ g/cm}^3$ ; J2 钻孔的 2 号、3 号和 4 号土样也均属于 B 层, 对应的干密度为  $1.53 \text{ g/cm}^3$ 、 $1.56 \text{ g/cm}^3$  和  $1.55 \text{ g/cm}^3$ , 均大于或等于 B 层土的控制干密度  $1.53 \text{ g/cm}^3$ 。通过以上比较发现 J1 钻孔位置的 B 层填土土质松散, 为松散体, 与物探成果一致。

#### 4.5 验证结论

通过对 18 个异常部位的验证, 其中有 16 个

确定异常区域是非常有效的。

## 5 结论

(1) 探地雷达法可作为本次堤防隐患探测的主要物探方法, 可用于堤防隐患的普查, 其探测效果好, 反映的地层结构信息和土体异常更准确, 不仅能反映出土体异常的性质, 而且能对异常的形态和规模进行量化<sup>[7]</sup>, 且相对于其他探测方法, 收费便宜, 是最经济实用的堤防隐患探测普查手段。

(2) 高密度地震映像法和瑞雷面波法可作为本次堤防隐患探测的辅助物探方法。高密度地震映像法对地层结构、土体松散异常有明显的探测效果, 但是该方法只能探测到隐患的平面位置, 不能够确定隐患的埋藏深度, 只能作为辅助手段; 瑞雷面波法对地层结构的划分和堤防隐患的探测均具有较好的效果, 探测深度较深, 且不受地下水位影响, 适合于对地层的精细划分, 获取地层的剪切波速度等物性参数, 但该方法野外工作量很大, 探查时间长, 且收费标准高, 若全线使用的费用太高, 可作为辅助物探方法对探测到的土体异常部位进行详测佐证。

表 2 钻孔注水试验成果表

孔号	桩号	地下水位 (m)	试验段位置			试段长度 (m)	注水位置	渗透系数 (cm/s)
			层号	试段深度 (m)	试段高程 (m)			
J1	15+528	8.53	B	3.00 ~ 7.00	14.56 ~ 10.56	4.00	堤顶	$5.9\text{E}-2$
J2	16+292	8.47	B	2.50 ~ 6.50	15.21 ~ 11.21	4.00	堤顶	$1.0\text{E}-4$

表 3 击实试验成果表

堤防等级	土层	最大干密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	压实度值	控制干密度 ( $\text{g/cm}^3$ )
2	B	1.64	0.93	1.53

孔与物探成果一致, 正确率达到 88.89%, 证明本次物探探测成果准确可靠。探地雷达法、高密度地震映像法和瑞雷面波法对隐患部位都有明显的异常反映, 由此说明在详查中使用探地雷达法、高密度地震映像法、瑞雷面波法三者的对应关系来

(3) 地震反射波法和大地电导率法不适用于本工程堤防隐患探测。地震反射波法探测深度较大, 对划分大深度的地层结构有良好的探测效果, 但不能对堤防人工填土层中存在的富水、松散、空洞等有效探测, 不满足探测工作的精度要求; 大

地电导率法仅对富水区有探测效果,对含水率较低的隐患探测效果较差,具有较大的局限性,不予采用。

(4)可采用静力触探试验结合钻孔取土、土工试验和注水试验对探测异常部位进行综合验证,进一步确保探测成果的准确性,提高物探成果的可靠性和实用性。

(5)对比分析5种物探方法的适用性、经济性及其优缺点,本工程总结提出“以探地雷达法普查,以瑞雷面波法或高密度地震映像法对普查发现的异常区域详查,并对拟处理的部位用静力触探法或钻孔取样法验证”的综合性探测技术。该方法可广泛应用于复杂堤防隐患探测工作中,尤其当堤防长度较长时,该方法具有经济、准确、快速、简便、无损等优点,可快速有效的探测出土质堤坝和堤基在深部的状况和隐患的位置、深度、宽度情况等重要信息。

## 6 结语

通过各种方法的应用比较,本工程发现各种物探方法在解决不同问题的能力 & 优势<sup>[8]</sup>,根据探测任务的具体情况,取长补短,创新性提出了一套“以探地雷达法普查,以瑞雷面波法或高密度地震映像法详查,并用静力触探法或钻孔取样法验证”的综合探测技术,适用于分准入沂等松散复杂堤防隐患的探测,且已成功应用于分准入沂全线 97.5 km 堤防探测,为工程全线探测作业提供了指导性成果,也为保证探测成果的可靠性奠定了坚实的基础。该成果既能发挥各种物探方法

的优势,又可利用各种方法做进一步的互相验证,提高了物探成果的可靠性和实用性,取得了良好的应用效果,不仅为后续确定堤防隐患处理加固方案提供了科学的依据和支撑,且为松散复杂堤防隐患探测提供一套准确、高效的物探方法和思路,为以后类似工程提供可借鉴的经验。

## 参考文献:

- [1] 孙超君. 质量管理工作在分准入沂整治工程中的探索[J]. 治淮, 2016(10):33-34.
- [2] 江苏省水利勘测设计研究院有限公司. 分准入沂整治工程初步设计报告[R]. 扬州: 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 2012.
- [3] 李雷, 张国栋. 我国堤坝隐患技术面临的问题与建议[J]. 水利水电工程学报, 2009(4):91-97.
- [4] 冷元宝, 朱文仲, 何剑, 等. 我国堤坝隐患及渗漏探测技术现状及展望[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(2):59-62.
- [5] 葛双成, 江影, 颜学军. 综合物探技术在堤坝隐患探测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1):263-272.
- [6] 黎昱, 邓社根, 徐荣. 不同物探手段在堤防隐患检测中的应用对比分析与研究[J]. 中国集体经济, 2017(17):114-117.
- [7] 翟铎, 黄小祥, 王颖聪, 等. 探地雷达技术在马汉河堤防隐患探查中的应用[J]. 黑龙江水利, 2015(11):43-48.
- [8] 赵志宏, 邢庆祝. 综合物探技术在水库堤防渗漏通道探测中的应用[J]. 矿产勘查, 2011, 5(3):322-324.