

# 地震映像技术在地下工程透水事故中的应用

张宇辉<sup>1,2</sup> 张献民<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016; 2. 中国民航大学机场工程与管理学院, 天津, 300300)

**摘要:**某地下开挖工程出现透水事故, 引发地基沉降, 上部建筑物楼体开裂。地下沉降情况不明, 对周边建筑安全构成威胁。采用地震映像技术对隐患区地下土层变化进行了追踪测试。结果表明: 地下土层受透水影响, 出现多点沉降异常, 且伴有地下空洞正在形成。数据分析结果为沉降区后期加固修护提供了依据, 并可为类似工程处理提供参考。

**关键词:**地震映像; 地基沉降; 开裂; 工程检测

**中图分类号:** TU471.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-2615(2012)02-0266-07

## Application of Seismic Image Technology in Water Accident of Underground Project

Zhang Yuhui<sup>1,2</sup>, Zhang Xianmin<sup>2</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. School of Airport Engineering and Management, Civil Aviation University of China, Tianjin, 300300, China)

**Abstract:** In the water accident of an underground project, the foundation settlement and the cracks of adjacent structures are caused. Safety of surrounding buildings is threatened because of unknown subsidence. The technology of seismic image is applied to tracing test of underground soil in hidden trouble area. The results show that, underground soil layers are affected by water accident, by which multi-point abnormal subsidence and underground cavities are caused. This conclusion is valuable in post repairing and strengthening in hidden trouble area.

**Key words:** seismic image; foundation settlement; cracks; engineering test

某地下开挖工程中出现透水事故, 1号路与2号路交口附近, 地下25 m处发生透水, 导致地面楼体出现裂缝, 对周边建筑安全构成威胁。附近居民楼墙体出现裂缝, 道路两侧路缘出现裂缝且明显下沉, 周边建筑物地基发生不同程度沉降。隐患区内地下土层受透水影响变化情况不明, 存在严重安全隐患。采用地质雷达方法沿透水点附近道路中心线进行观测, 剖面采集采用100 MHz屏蔽天线, 采样频率1 500 Hz, 单道采样点数为333个, 叠加次数16, 但因为事故区域处于闹市区, 噪声严重, 且事故

区域周边工程并未停工, 各种器械振动对雷达信号采集干扰较大, 未达到预期测试效果。为此, 采用地震映像技术进行了浅层地基土体测试, 通过分析测试数据研究了周边隐患区内土层变化情况, 为加固修护提供了科学依据。

### 1 基本原理及技术参数确定

地震映像<sup>[1]</sup>是基于反射波法中的最佳偏移距技术的浅地层勘探技术。采用竖向锤击地面激振, 并采用竖向震动传感器接受信号, 此时获得的信号

将主要包含纵波和面波<sup>[2-4]</sup>,同时还伴有SV波。图1为反射波传播路径图。

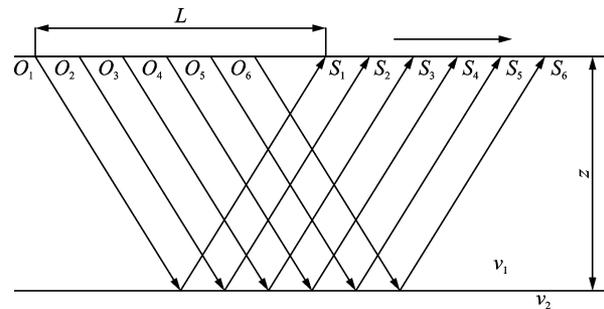


图1 反射波传播路径图

图中: $L$ 为偏移距; $O_1, O_2, \dots, O_n$ 为激发点; $S_1, S_2, \dots, S_n$ 为接收点;箭头所示为激发点和接收点前进方向。界面水平时,反射点在激发点和接收点中点下的界面上,反射波<sup>[5]</sup>传播时间和界面深度有关,反射波时距方程为 $T = \sqrt{4z^2 + L^2} / v_1$ 。当界面水平时,每次激发的反射波传播时间不变;当界面深度发生变化时,反射波的传播时间会发生变化。这样,可以根据反射波同相轴的变化情况定性推断界面起伏情况。

从图1中可以看出,激振波经地层反射而到达传感器,在锤击产生的一系列波中采用反射纵波来判断地层变化情况,此时反射纵波为有效波,而面波<sup>[6-7]</sup>、SV波、直达波及环境振动都为干扰波,会对数据分析带来干扰。为了提高信噪比、获得准确的检测结果,必须针对实际情况研究这些波的特点,从而实现压制干扰波、将有效波和干扰波<sup>[8]</sup>分离。选择合适的信号采集参数可以很好地把有效波分离出来,有效提高信噪比。影响振动信号信噪比的主要参数有:记录时间长度、采样率、最佳偏移距等。这些参数可以通过模型计算,并结合现场试验来确定。

偏移距的选择在于要使被探测目的层的反射波尽量不被直达波和其他干扰信号所掩盖。偏移距过小则各种直达波和干扰波尚未明显衰减,振幅较大,其与反射波混杂一起,难以区分。偏移距过大则会导致有效信号能量损失严重,且随着入射角的增大会产生宽角反射<sup>[9-13]</sup>的相位畸变,不利于波形分析。偏移距的选取应使反射纵波有较大的振幅,容易分辨,且不在数据处理的切除范围之内,即不能超过采样的记录长度。最佳偏移距位于接受有效波的最佳地段之内,该最佳地段的确定被称为“最佳窗口技术”。最佳窗口技术就是选择干扰波和有效波明显分离的测线段,以利于有效波形数据分析的方法,根据实际地层情况进行的计算分析,偏移

距选择2~4 m地段进行数据采集。

记录长度必须能够记录到目的层来的反射波,并留有一定余量。采样间隔越小,即采样率越高,测量精度就越高,但它要受到两个条件的限制:(1)受仪器采样点数的限制,即采样间隔乘以采样点数必须大于或等于预设记录长度;(2)采样间隔必须小到不使预期的最高频率假频化。这里的“假频化”是指由于时间采样率不足,原信号取样后出现假频的现象。采用尼奎斯特(Nyquist)频率 $f_N$ 来避免假频现象, $f_N$ 是指在给定采样间隔 $T$ 的条件下可还原的最高频率,定义为 $f_N = 500/T$ ,其中 $T$ 以毫秒为单位,它表明采样间隔在理论上应满足 $T \leq 500/f_{\max}$ ,这里的 $f_{\max}$ 为预期可获得最高频率。实际应用时多采用 $T \leq 250/f_{\max}$ 来选定采样间隔 $T$ 。反射纵波、反射横波及面波信号都在0~500 Hz之间,即采样间隔应不大于1 ms。因此,实际采集数据时,采用0.06 ms的采样间隔,530个采样点,即记录长度为31.8 ms。

## 2 测试技术分析

### 2.1 抗干扰分析

在激发点激发反射波后,引发一系列波动现象。锤击引起的地下波动是反射波、折射波、纵波、剪切波、面波等波动的综合体现。如果试验点在比较繁华嘈杂的闹市区或工程现场附近,还有周围的噪音声波、车辆来往和工程夯实引发的地下振动对反射波映像分析带来干扰。在实际操作中,选取良好的炮点间距及采样间隔等参数,可以保证得到的波谱曲线中各种波初至时间相对明确,而后期滤波分析可以有效地去除波谱中环境振动对反射波映像的影响。

本实验中采用0.06 ms的采样间隔,激发点偏移距2 m,测点间距为1 m。其结果如图2所示,横坐标为激发点号,纵坐标为时间。横坐标中标识采样侧线上各采样点的具体位置,纵坐标经过波速反衍可以判断出地下不同深度处的波动映像变化情况。从图中可以看出,反射波的映像效果较好,比较明显与地表直达波等干扰波分离,从而保证了实验的精度。

### 2.2 测试方法简介

如图3所示,共布置测线4条,1号路3条,2号路1条。其中I、II测线位于1号道路两侧,起始测点位于3号路方向,距离1号路与3号路交叉口50 m。其余两条测线均位于道面中线,其中III测线起点位于1号路与3号路交叉口,IV测线起点位于2号路中线与3号路交点位置。对透水点附近地下土层进行追踪测试。测试天数共13 d。其中I测线完成2 671个振动映像点、II测线完成2 674个振动映像点、

测线完成1 076个振动映像点,Ⅳ测线完成1 012个振动映像点,共计完成7 433个振动映像点。

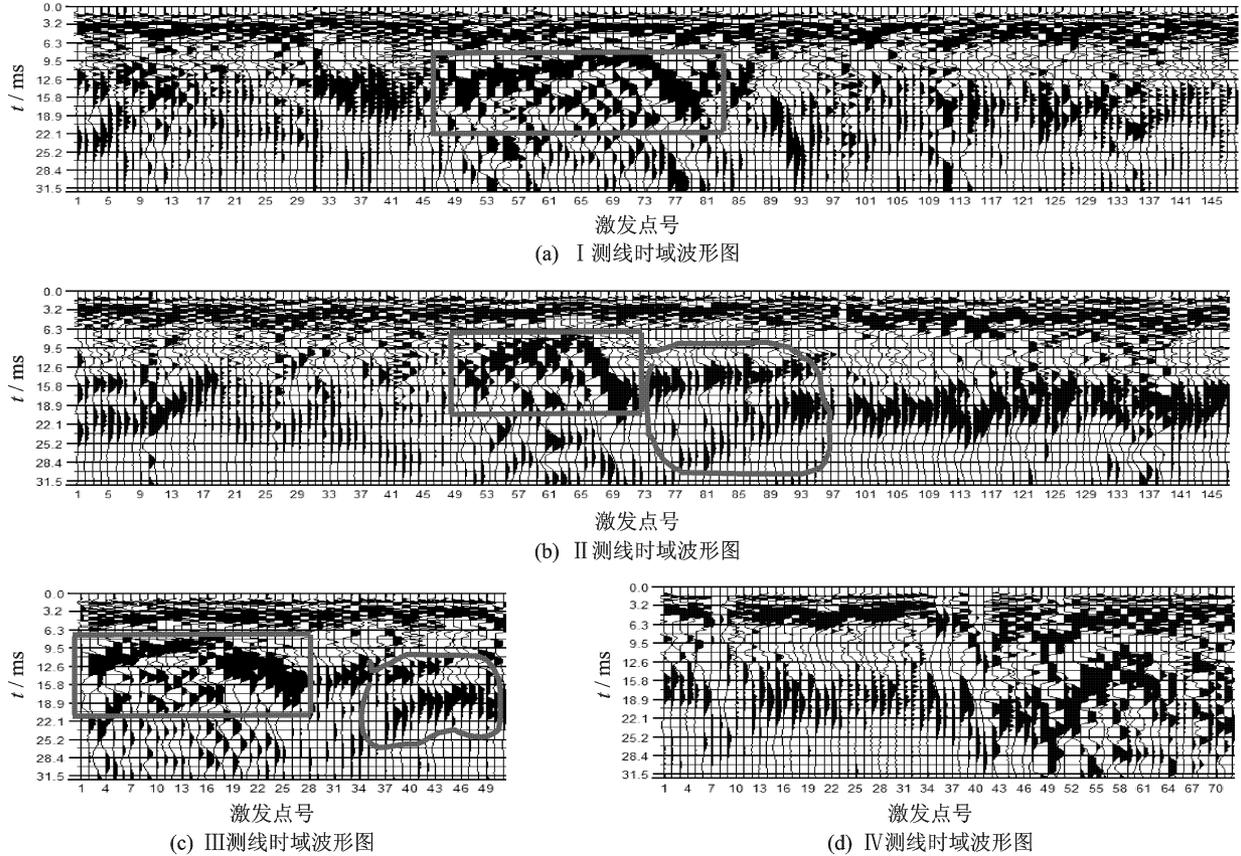


图2 I~Ⅳ测线地基界面时域波形图

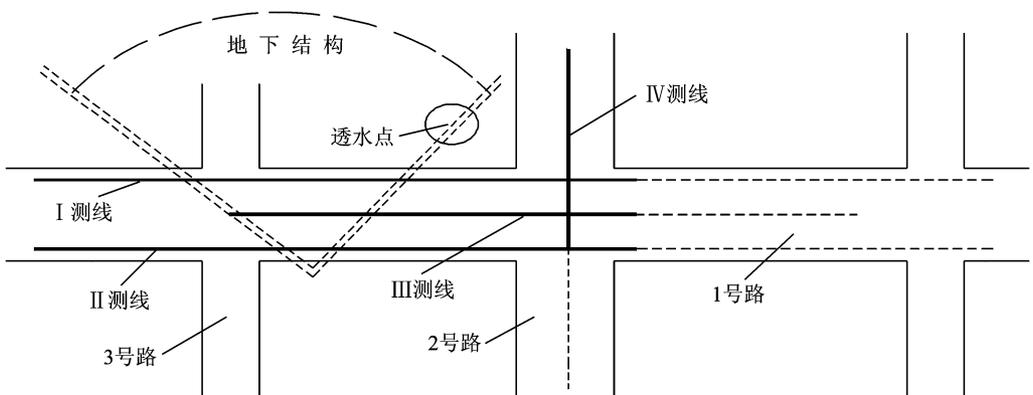


图3 测线布置图

### 2.3 地震映像理论分析

地震映像是利用纵波反射波同相轴技术来判断地下土层情况的方法。纵波从地表向下传播,如遇到不同介质界面时,产生界面反射,反映在信号中为衰减波幅突然增大。利用此原理,可求取连续采集地点反射信号中的同相轴,即同一反射波到达时间点附近波幅突变的信号点,这些突变点相连接就形成了映像中的同相轴,可反映地下不同介质层分界面。当同一同相轴界面发生断层或突变凹陷

时,可以判定此时的介质面发生向下塌陷;当同一同相轴界面发生突变凸起,且形成明显半圆,则可判定此时的介质面上方已形成空洞,对上部结构的安全运行已构成严重安全隐患。

## 3 数据处理及测试分析

### 3.1 已知地下结构测试效果分析

如图3所示,双虚线所框范围为已知地下结构。1号路布置3条测线,测点从3号路方向起始向

2号路方向延伸。偏移距选择2 m,测点间距为1 m。图2为I~IV测线地基界面波形反应。

由图2可得,各测线时域波形在15.8 ms处存在明显界面反映,在整个测线范围内均有显示,属背景场。如图2中矩形框所示,在I测线时域波形图中,距测点起始端45 m至89 m存在明显空洞异常,长约36 m;II测线图显示,距起始测点49 m至70 m存在空洞异常,长约20 m;III测线图中,从测线起点开始有长约28 m的空洞异常显示。结合图3所示的地下结构图可以看出,上述3条线中的空洞异常为已知地下结构的正常反应,且空洞长度随I测线、III测线、II测线的顺序而递减,与地下结构的围界分布情况相符合。测试数据较好地克服了周围繁杂声波的干扰,可以比较客观地反应地下土层的变化。

图2中,II测线距起始测点69 m至91 m处、纵坐标15.8 ms时间时,波形存在明显界面不连续异常,如图2(b)中黑线所圈。III测线时域波形图中,对应II测线的界面不连续异常仍然存在(距起始点40 m至49 m处存在明显界面不连续异常,如图2(c)中黑线所圈)。IV测线以2号路中线与III测线交点为起始端,向透水点方向延伸。从IV测线时域波形图中可以看出,距起始测点46 m至64 m,时间为15.8 ms处波形图存在明显异常,如图2(d)中46~64道间映像所示,对比地下施工历史资料分析,可确定此异常为地下埋设管道所致。

### 3.2 地基沉陷区分析

从图2中可以看到,延1号路方向距II测线起点70 m后,土层背景界面有所下降,反射能量有所增强,为进一步判断地下土层变化,从第七观测日起,I,II测线延原方向延伸100 m。III测线延原方向延伸50 m。IV测线重新布置为测线长度90 m,位于2号路中线位置,测线终点为2号路中线与I测线交点。测线变化示意图见图3中虚线所示。综合不同观测日各测线波形映像,可得I测线位置无明显沉陷带和地下隐患出现。图4,5分别为II测线和III测线不同观测日时域波形对比图。

图4为II测线位置不同观测日地下土层映像对比图。II测线前六天波形曲线没有明显变化,距起点69 m至91 m处,界面依然存在不连续,但形状较稳定。测线延长后可以看出,距起点229 m至247 m存在一明显空洞异常,如图4中黑线圈所围

区域,对比实际位置,该异常正处于道路交叉口,对比该区地下工程历史资料可确定为地下管道异常。图4中黑线框所围区域为距测线起点91 m至175 m处,从图中可看出背景界面整体断开向深部下移至约18.9 ms处,此区域确定为沉陷带。图4中列出了不同观测日该沉陷带的波形映像,从中可看出到第8观测日为止,沉陷带形状有微小变化,对比时间纵坐标轴分析可看出,第8观测日沉陷带与第7观测日沉陷带相比下沉约0.3 m。但从第8观测日开始沉陷带形状基本无变化,此沉陷区域地层趋于稳定。

如图5所示,III测线位置地下土层活跃,波形映像变化较大。图中1~28道数据所示的大弧形映像为地下结构。与图3中III测线时域波形图相比,第2观测日据起点40~46 m处,界面出现下降趋势,有明显断层,该区域地下土层不稳定。图5(c)中,在距起点28~52 m处,时域波形从无序映像变为弧形映像,有形成地下空洞的安全隐患。图5(d)波形图中,除已有弧形映像外,距起点52~69 m范围内地下区域开始弧形变化。到第10观测日为止,距起点28~69 m处共出现两处沉陷异常区域,该区域地层不稳定,仍处于变化之中,且在90~112 m区段内出现新的波形异常,如图5(f)中最右端黑线所圈。图5(g)中,距起点28~69 m区域的异常沉陷区逐步发展,受地下松动界面影响而呈空洞异常,并逐步向地表发展,并将90~112 m处地下区域确定为新的异常沉陷地区。

位于2号路上的IV测线映像中,不同观测日时域波形变化不大,地下土层基本处于稳定状态,无明显沉陷异常出现。

综合上述分析结果,在1号路沿测线方向出现多处沉陷异常区域,个别区域界面松动引发空洞异常,并向地表发展,对道路两侧建筑结构形成严重威胁,应尽快予以加固修护。

本实验中,地震映像技术在客服现场严重噪声及工程器械振动干扰下取得较好效果,该技术能准确反映地下土层的变化情况。但此技术对地下土的压实情况有较高要求,由于波在地基中的传播特性,映像技术对已有的压实土层地基的判断较为准确,而在高原及地势起伏较大且地下土压实程度不高的野外区域判定时,局限性较大。

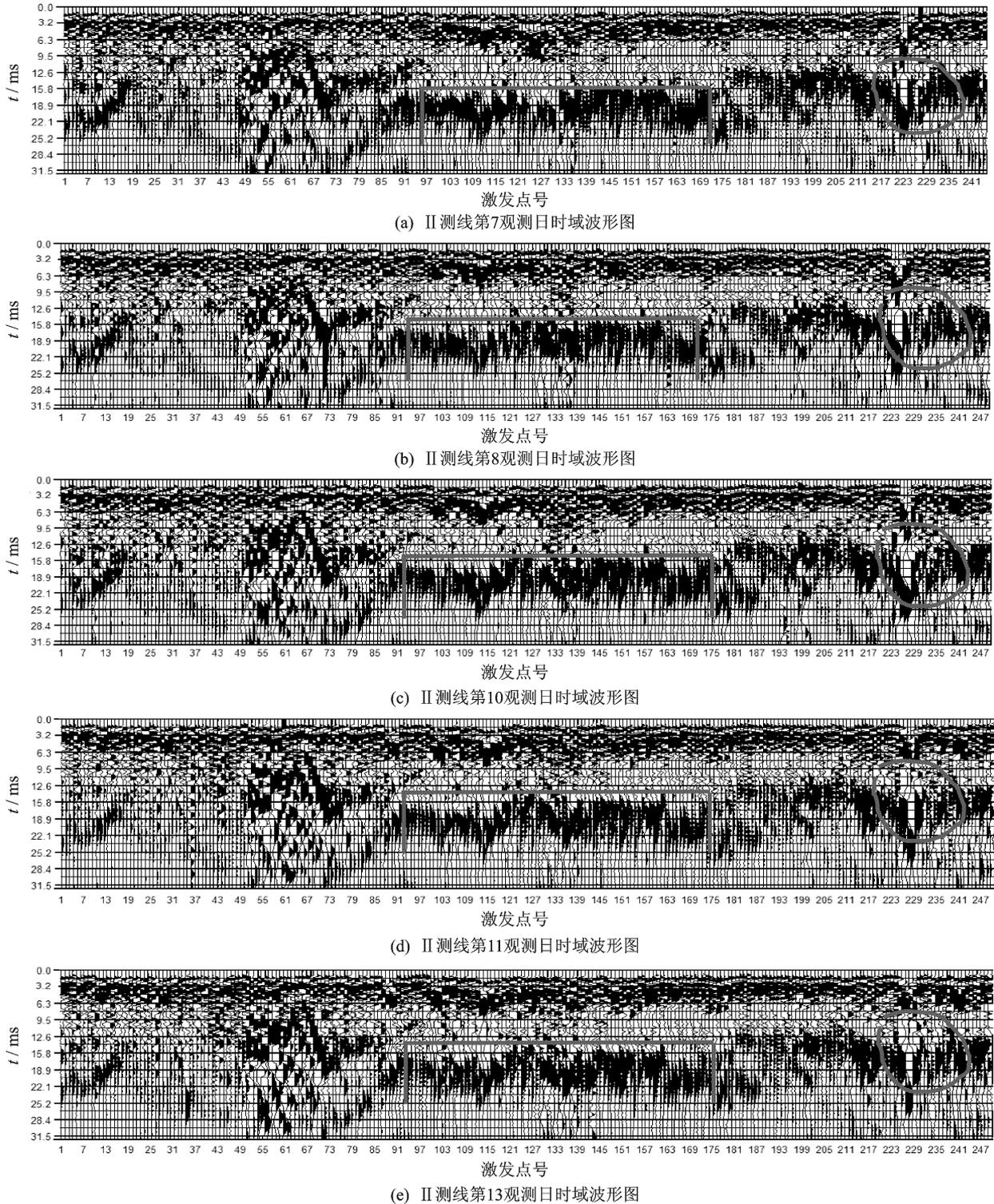
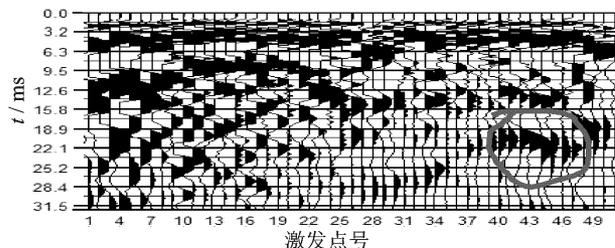


图4 II测线时域波形对比图

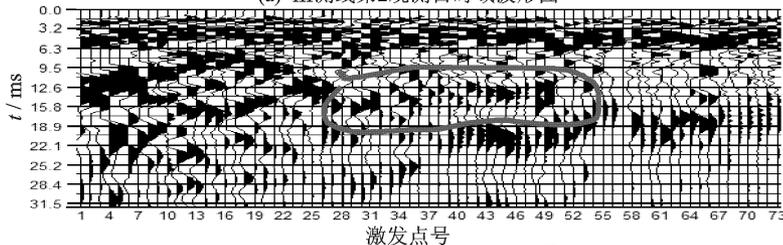
## 4 结 论

(1) I测线、II测线、III测线均明显反映出了与实际地下工程相吻合地下结构;在整个测线范围内约15.8 ms处反映出属背景场的波速界面,验证了映像波形的正确性。

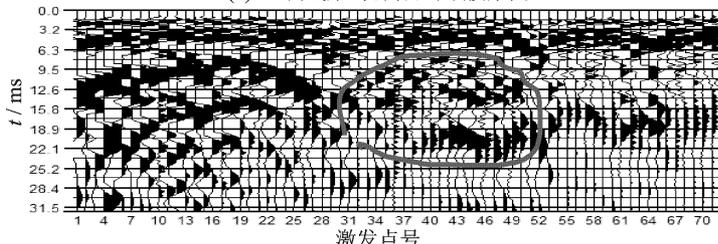
(2) 综合分析各测试时域波形图可得:1号路沿II测线方向距测线起点91~175 m处为沉陷带,但该区域地下土层较稳定。1号路沿III测线方向距测线起点28~69 m处,受地下界面松动影响而呈空洞异常,并逐步向地表发展;距起点90~112 m处为沉陷异常带,需要进行加固修护。2号路无明显



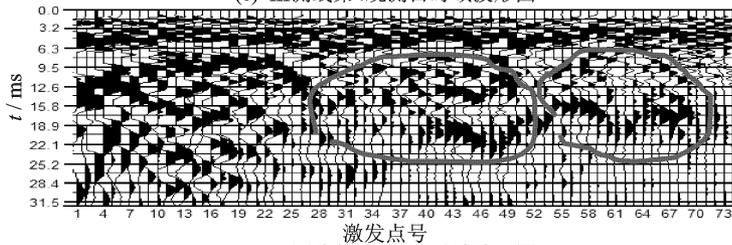
(a) III测线第2观测日时域波形图



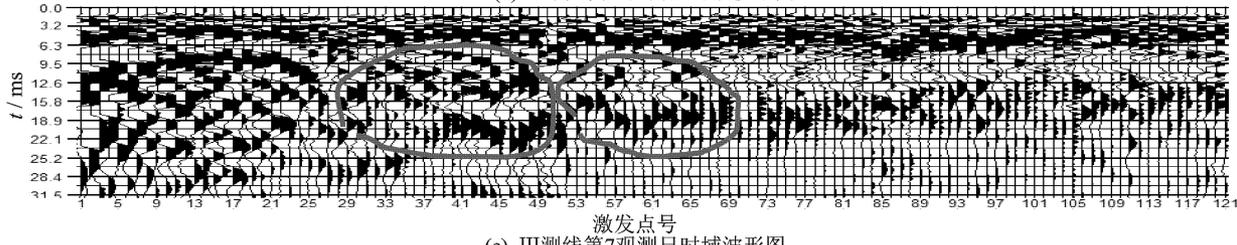
(b) III测线第3观测日时域波形图



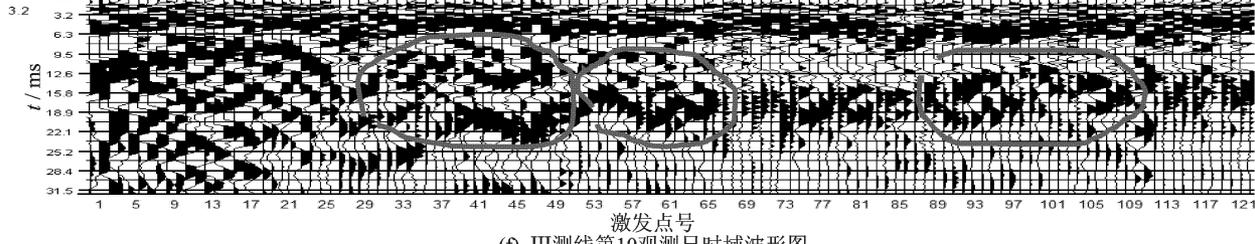
(c) III测线第4观测日时域波形图



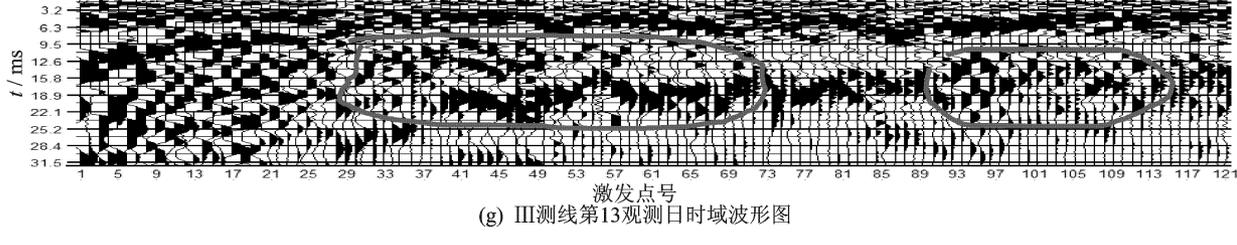
(d) III测线第6观测日时域波形图



(e) III测线第7观测日时域波形图



(f) III测线第10观测日时域波形图



(g) III测线第13观测日时域波形图

图5 III测线时域波形对比图

显沉陷异常出现。

(3) 从数据分析结果可以看出,地震映像技术在地下沉陷检测中可以得到较好效果,能准确反应地基界面的各种变化。本文研究成果为后期沉陷区修护提供科学依据,并可为类似工程处理提供参考。

(4) 本文数据是在克服现场严重噪声干扰的情况下取得。当参数选取合适时,地震映像可较准确反映地下土层的变化情况。测试结果为城市繁杂噪声情况下工程振动测试提供借鉴。

#### 参考文献:

- [1] 蔡靖, 张献民, 赵晓艳. 高密度震动映像在地基防渗墙无损检测中的应用研究[J]. 水利水电技术, 2005, 36(3): 75-78.  
Cai jin, Zhang Xianmin, Zhao Xiaoyan. Study on application of high-density seismic image for nondestructive detection of impervious wall of dyke[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2005, 36(3): 75-78.
- [2] 陈龙珠, 严细水, 赵永倩. 关于面波法检测地基波速中的测点布置问题[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 63-66.  
Chen Longzhu, Yan Xishui, Zhao Yongqian. On arrangement of transducers in surface wave measurement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 63-66.
- [3] 刘江平, 罗银河, 何伟兵. 相邻道瞬态瑞雷面波法与压实度检测[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(11): 1652-1659.  
Liu Jiangping, Luo Yinhe, He Weibing. Method of neighboring trace transient Rayleigh wave and its application in compactness inspection [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(11): 1652-1659.
- [4] Park B, Miller R D, Xia J. Multichannel analysis of surface waves[J]. Geophysics, 1999, 64(3): 800-808.
- [5] 单娜琳, 程志平, 刘云祯. 工程地震勘探[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.  
Shan Nalin, Chen Zhiping, Liu Yunzhen. Engineering seismic exploration[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [6] 黄健, 凡友华, 高夕超, 等. 两道瑞雷波法在路基压实度检测中的应用[J]. 公路, 2007, 7: 145-147.

Huang Jian, Fan Youhua, Gao Xichao, et al. Application of two channel rayleigh wave method to inspection of degree of compaction of subgrade[J]. Highway, 2007, 7: 145-147.

- [7] 缪林昌, 邱钰. SASW 法在基础工程和路基工程中的应用研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 149-152.  
Miao Linchang, Qiu Yu. Research on application of SASW method to foundation and subgrade engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 149-152.
- [8] 王克斌. 复杂地表条件下初至折射波静校正方法的研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2004.  
Wang Kebin. Refraction first-beak statics method under complex near-surface conditions[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2004.
- [9] 霍浩, 查树贵, 王立新, 等. 广角反射波动校叠加方法[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(3): 273-275.  
Huo Hao, Zha Shugui, Wang Lixin, et al. The method of wide angle reflection stackable wave[J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2006, 28(3): 273-275.
- [10] 夏洪瑞, 葛川庆, 邹少锋. 具有截断误差校正的广角反射 NMO 方法[J]. 石油物探, 2005, 44(2): 154-158.  
Xia Hongrui, Ge Chuanqing, Zou Shaofeng. NMO method of wide angle reflection with truncation error correction[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2005, 44(2): 154-158.
- [11] Wang H, Sun L, Martinez R. Optimized 6th order NMO correction for long-offset seismic data [C]// Expanded Abstracts of 72nd Annual Internat Meeting. SEG: Expanded Abstracts, 2002: 2313-2316.
- [12] 夏洪瑞, 葛川庆. 误差均值法实现广角反射 NMO 校正[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(4): 381-387.  
Xia Hongrui, Ge Chuanqing. NMO correction of wide-angle reflection by mean errors value method [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2005, 40(4): 381-387.
- [13] 袁海科. 基于误差均值法的广角反射 NMO 校正实现方法[J]. 石油天然气学报, 2005, 27(6): 724-725.  
Yuan Haike. The method of wide angle reflection NMO correction based on the error mean algorithm [J]. Journal of Jiangnan Petroleum Institute, 2005, 27(6): 724-725.