

doi: 10. 11720/wtyht. 2022. 2467

马国凯,魏定勇,刘爱友,等. 浅层地震技术在南水北调中线工程 PCCP 管道缺陷探测中的应用[J]. 物探与化探,2022,46(2):525-530. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2467>

doi: 10. 11720/wtyht. 2022. 2467

Ma G K, Wei D Y, Liu A Y, et al. Application of shallow seismic exploration technique in defect detection of PCCP used in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(2): 525-530. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.2467>

浅层地震技术在南水北调中线工程 PCCP 管道缺陷探测中的应用

马国凯, 魏定勇, 刘爱友, 林万顺

(北京市水利规划设计研究院, 北京 100044)

摘 要: 南水北调中线工程北京惠宁段采用了 PCCP 管道输水, 经长时间运行, PCCP 管道相继出现了断丝、管壁开裂、局部不均匀沉降等病害。本研究针对惠宁段工程中 PCCP 管道常见的工程地质缺陷, 开展了以高密度地震映像及面波法为主的浅层地震试验, 得到了 PCCP 管道及基础垫层的物性特征, 准确排查了管壁裂隙及地质不密实隐患, 为排查 PCCP 管道病害提供了宝贵经验。

关键词: 南水北调工程; PCCP 管道; 浅层地震技术; 高密度地震映像; 面波法

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2022)02-0525-06

0 引言

南水北调中线工程是实施我国水资源优化配置的特大型基础设施项目。工程从长江支流丹江口水库引水终至北京, 全长 1 267 km。本研究所在的北京惠宁段位于南水北调中线工程的末端。PCCP 管道, 即预应力钢筒混凝土管 (Prestressed Concrete Cylinder Pipe), 在我国引调水工程中越来越多被使用^[1], 而中线工程北京惠宁段就采用了 PCCP 管道输水。

自 2008 年南水北调中线工程北京惠宁段首次通水以来, 经过长时间的运行, 沿途 PCCP 管道相继出现了断丝、管壁开裂、局部不均匀沉降等病害。基于 PCCP 管道结构的复杂性, 加之北京惠宁段工程早期以国外标准进行了建设, 使得长期以来对于该工程的检测及监测由国外团队开展, 这大大增加了工程的日常管理和维护难度^[2]。

本工程既往的检测及监测手段主要是电磁法检

测技术及阴极保护监测等, 针对的工程问题主要是判别结构性断丝。但考虑到管道周围岩土体的物性环境变化, 如: 管底脱空或垫层不密实等, 可能是引起断丝的原因之一, 因此有针对性的开展了本研究的试验工作。这里只对本工程既往的检测、监测手段进行简单介绍。

本工程既往的检测手段为远场涡流检测技术, 即以一定的频率和幅度信号, 经发射线圈发射交变低频磁场, 感应出能穿透管壁的涡流信号进行检测。但该方法对于管底构造及垫层不密实隐患难以探查。而本工程的监测手段主要有两种, 一种是利用分布式光纤声波实时监测技术 (AFO 监测), 另一种是根据《埋地预应力钢筒混凝土管道的阴极保护》(GB/T 28725—2012) 开展的阴极保护监测, 即平行 PCCP 管道埋设带状锌阳极, 同时在一定间隔和构建连接处对应位置安装测试盒, 长期进行监测, 以此达到安全监测的目的。

北京市水利规划设计研究院结合工程的实际情况, 利用 2019~2020 年度南水北调中线工程北京惠

收稿日期: 2020-11-25; 修回日期: 2021-11-02

基金项目: 2017 南水北调干线工程 (北京段) 运行维护之技术咨询项目“PCCP 管外预应力固技术” (GXGLC-JSZX-2017-CG01)

第一作者: 马国凯 (1991-), 男, 工程师, 2016 年毕业于中国地质大学 (武汉), 主要从事工程物探等方面的工作。Email: 610699788@qq.com

通讯作者: 林万顺 (1970-), 男, 教授级高级工程师, 主要从事工程物探及微动技术研究等方面的工作。Email: lwanshun666@sina.com

宁段停水检修的时机,在分析了工区的地球物理条件后,针对北京惠宁段工程 PCCP 管底常见的工程地质缺陷,开展了本次高密度地震映像及面波法为主的浅层地震试验,排查了管壁裂隙及垫层不密实隐患,为 PCCP 管道病害排查提供了新的经验^[3-5]。

1 工程概况及背景

南水北调中线工程北京惠宁段 PCCP 管道是在带有钢筒的混凝土管芯外侧缠绕环向预应力钢丝,并在管体外侧辊射水泥砂浆保护层而制成的一种复合型管材。本工程的 PCCP 管道总厚度为 0.45 m,管底基础垫层厚度约 0.3 m,结构见图 1。工程中每节标准管道长 5 m、内径 4 m,PCCP 管道的主要材质为混凝土管芯并内置预应力钢丝,部分连接管段为同管径的钢衬。

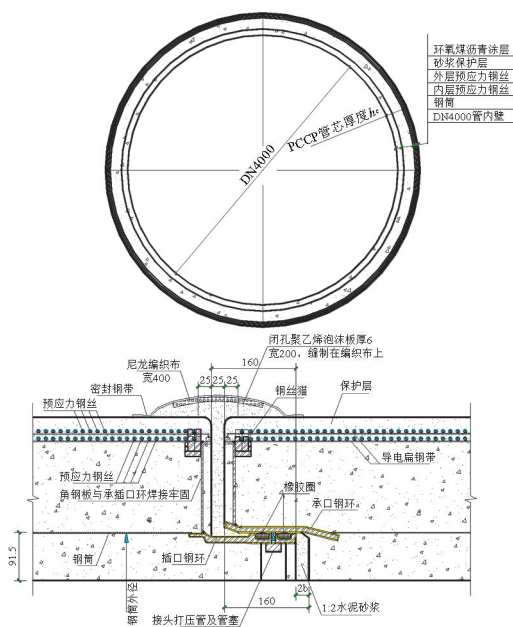


图 1 埋置式预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构

Fig. 1 The structure diagram of the prestressed concrete cylinder pipe(PCCP)

北京惠宁段的 PCCP 管道经过长时间运行,在 2019~2020 年度的停水检修过程中,结合现场普查、物探电磁法及 AFO 等监测系统均发现了疑似断丝、管壁裂缝及不均匀沉降等病害。鉴于上述工程病害的存在,已对南水北调北京段干线的安全运行构成了潜在威胁。因此,开展 PCCP 管道的缺陷探测就显得十分必要。而既往的检测及监测工作未对管道周围环境,特别是管底垫层等位置进行探测,因此本研究针对管底层状结构及密实情况有的放矢地提出相应的研究思路。

由于长期以来北京惠宁段 PCCP 管道引用了国外标准进行设计和施工,后续养护也主要依托国外团队,这都导致了国内缺乏针对南水北调 PCCP 管道的缺陷探测经验。另一方面,这也促进了相关单位针对 PCCP 项目的一系列研究工作,而以高密度地震映像及面波法为主的浅层地震试验在 PCCP 项目中的应用是一次创新性的研究课题^[6]。

2 浅层地震技术

本研究有针对性地开展了高密度地震映像及面波法为主的浅层地震试验,以理论分析及可行性试验成果为基础^[7],对 PCCP 管底层状结构的物性特征进行分析,并进一步探索垫层位置的不密实隐患。

2.1 面波法

由于 PCCP 管体结构的复杂性,以及管底垫层的层状特性,采用面波法可以较为准确地进行基阶面波频谱分析,从而对 PCCP 管底的层状特征进行分析。

面波是一种特殊的地震波,主要包括拉夫波、斯坦利波及瑞利面波,而瑞利面波在振动波组中能量最强、振幅最大、频率最低,容易识别也易于测量,所以面波勘探一般是指瑞利面波勘探^[8]。瑞利面波在不均匀介质中瑞利波相速度(V_R)具有频散特性^[9-12],此点是面波勘探的理论基础。

P 波初至到瑞利波初至之间的 1/3 处为 S 波组初至,且 V_R 与 V_s 具有很好的相关性,其相关式为:

$$V_R = V_s(0.87 + 1.12\mu)/(1 + \mu),$$

式中: μ 为泊松比, V_R 与 V_s 单位 $m \cdot s^{-1}$,此关系奠定了瑞利波在测定岩土体物理力学参数中的应用;同时,瑞利波在多道接收中具有很好的直线性,即一致的波震同相轴,质点运动轨迹为逆转椭圆,且在垂直平面内运动。

依据上述特性,通过测定不同频率的面波速度 V_R ,即可了解地下地质构造的有关性质并计算相应地层的动力学特征参数^[13-14]。

2.2 高密度地震映像

高密度地震映像(又称高密度地震勘探和地震多波勘探)是基于反射波法中最佳偏移距技术发展起来的一种浅层勘探方法。高密度地震映像在工作中具有较快的探测效率,对地质体的形态特征有较好的探测效果。地震映像可以利用多种波作为有效波,也可根据探测目的采用一种特定波作为有效波^[15]。

本研究中,波形数据非常丰富,虽含有不同频率

的子波,但鉴于 PCCP 管底目标层非常浅,且层间物性差异较大,主要利用的是反射波。波形数据受覆盖层介质密度、泊松比等因素影响,其相位形态与地层厚度、介质物性等有关,振幅大小受介质的松散情况不同也会有所差异。因此,追踪波形数据的同相轴异常,并总结不同试验环境的波形特征就可以定性地识别异常情况。

另一方面,在本研究中地震映像每一点的波形记录均采用相同的偏移距激发和接收,得到类似于共偏移距效果的剖面波形图,使得有效波信号具有较好的信噪比和分辨率。

高密度地震映像法的优点在于资料的处理和显示,它把野外采集的地震波在计算机上进行压密,以不同的、可变换的颜色表示,直观地反映出地质体的变化和形态^[16]。

高密度地震映像法采集的地震波是多波,用解波动方程的方法,可以分解出各种已定名的波,但在存在不均匀地质体的边界条件下,要完全达到全波震相分析是很难的,到目前为止,在复杂的边界条件

下,人们无法得到波动方程的通解,只能对于某些特解进行研究,至少可以肯定它所显示的波场分布与地下介质分布有关,把它的形态特征与已知地质体的形态特征相对应,从而推断未知地质体的形态特征。

3 研究成果

3.1 面波法成果

为分析管底垫层的层状特性,获取不同地层结构的面波相速度特征^[17],本研究采用北京市水电物探研究所 SWS-7 型工程地震仪于 PCCP 管内开展了浅层地震面波试验。在 PCCP 管内沿管底轴线方向布线,共选取了 2 个试验管段(试验区未开挖管节)进行,试验均采用 4 Hz 检波器接收,检波器间距为 0.1 m。

为减小炮点对不同位置检波器的影响,炮点位于管底轴线方向,偏移距为 5.0 m。所获得的面波解释成果见图 2。

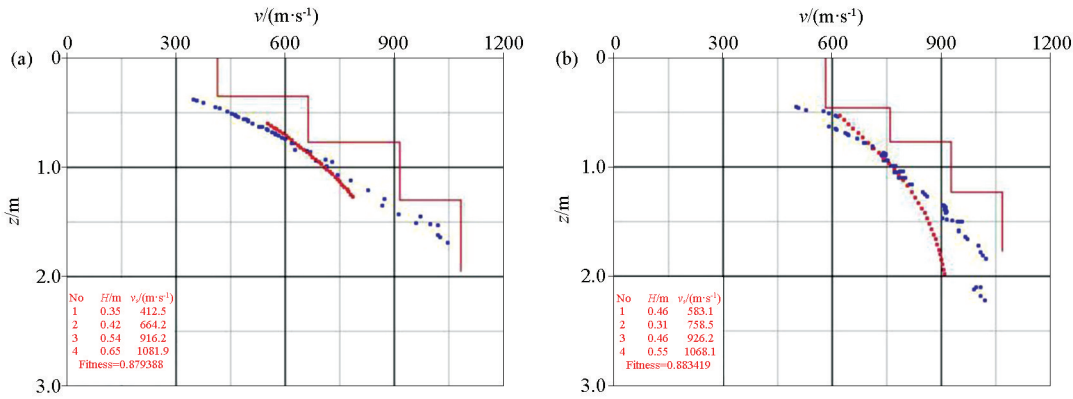


图 2 两处试验管段的面波法频散曲线成果

Fig. 2 Results of shallow seismic dispersion curves in two test areas

通过对两个管段的浅层地震试验进行解析可知:

- 1) 管底 0.40 m 深度内,浅层地震频散曲线数据点较少,无法计算波速;
- 2) 管底 0.40~0.75 m 深度内反演的相速度在 500 m/s 左右;
- 3) 管底 0.75 m 左右为第二层界面,浅层地震相速度在 700 m/s 左右;
- 4) 管底 1.25 m 左右为第三层界面,浅层地震相速度在 900 m/s 左右;
- 5) 管底 1.25 m 深度以后,相速度随深度进一步增加,达到 1 000 m/s 以上。

由于 PCCP 管道的整体结构厚度为 0.45 m,与管

底相接触的基础垫层厚度约 0.3 m,即基础垫层分布在 0.45~0.75 m 左右,故本研究对应的管底垫层区域为第二层界面,其面波相速度在 500~700 m/s。这对后续设计及检测工作提供了重要的物性基础。

3.2 高密度地震映像成果

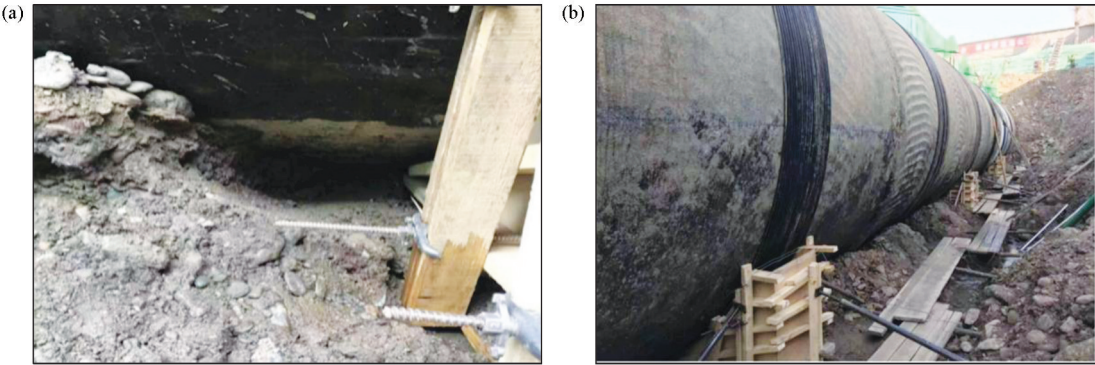
3.2.1 研究性试验

高密度地震映像试验同样采用了 SWS-7 型工程地震仪。试验中我们沿管底顺流方向布置测线,以 1.0 m 极距进行高密度地震映像探测。试验首先在北京周口河工区一处 PCCP 管道开挖现场进行,共布置 60 m 的测线,其中测线 0~5 m 及 50~60 m 的位置管底未开挖,5~50 m 的位置管底已开挖并临空,工况见图 3。

从试验区的高密度地震映像成果中可以看到,剖面图指示了地震波的波形信息(见图4)。在未开挖区域,管底与垫层接触良好,从而波形向下传播进入土体,所采集的地震波随时域增加迅速衰减;在开挖区域,管道临空放置,可等效为脱空或垫层不密实区域的异常情况。地震波在临空界面难以向下传播,同时受管道内外壁影响,波形经管壁内多次震荡,表现为连续的强波形信号。这一特征有别于未开挖区域,并逐渐从测试波形的7~8 ms开始显现。

未开挖区域之所以未出现上述波形异常,一种合理的解释是 PCCP 管道受周围土体密实包裹,大部分地震波能量在这种条件下进入了垫层或围岩而衰减殆尽,这与临空面能量难以衰减的波形震荡形成鲜明对比。因此,通过对试验区成果进行分析归纳,可以得到如下认识:

- 1) 在剖面成果中,结合本工区特征,需重点关注 7~8 ms 左右的波形异常变化;
- 2) 在整个时域中,可定性指征不密实区域的高



a—试验区开挖位置工况;b—试验区工况全景
a—working condition of excavation position in test area;b—panoramic view of working condition in test area

图 3 周口河工区研究性试验工况实景

Fig. 3 Working conditions of Zhoukouhe production test

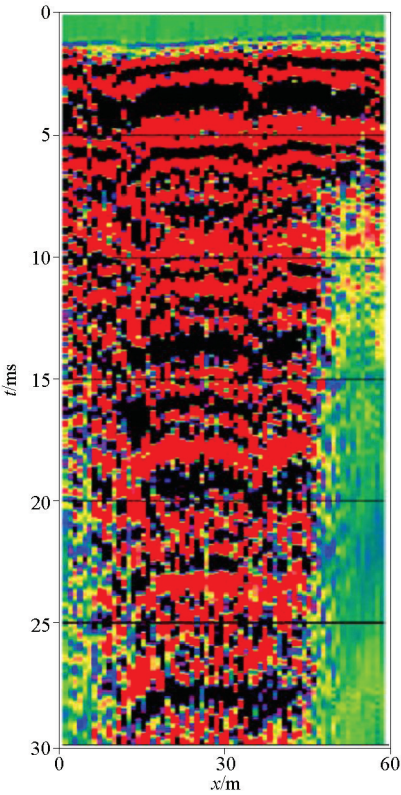


图 4 周口河工区高密度地震映像试验成果

Fig. 4 Results of high density seismic image in Zhoukouhe production test

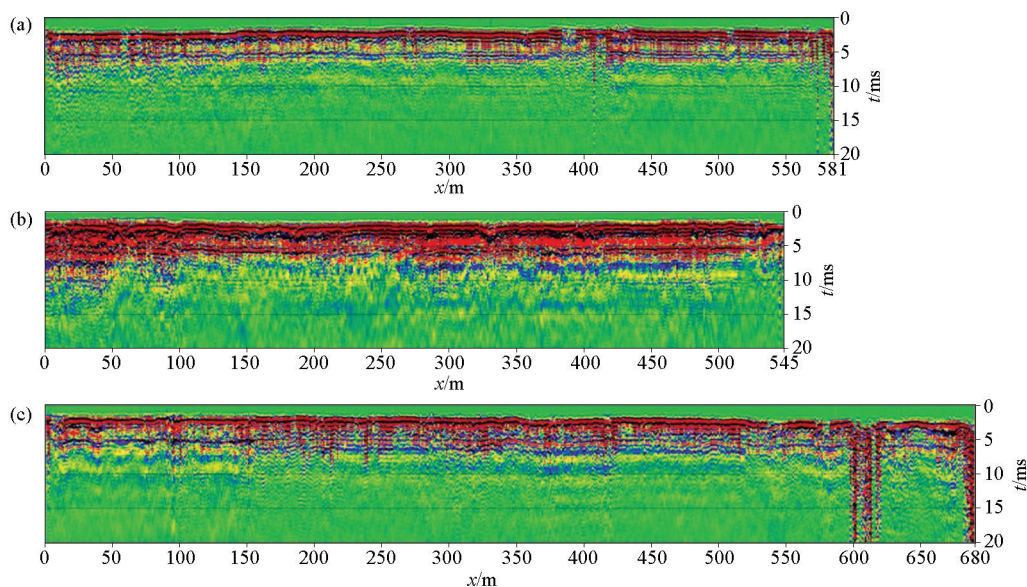
密度地震映像波形特征,即多次震荡的强波形信号。

3.2.2 研究性应用成果

根据研究性试验的认识及相关研究成果,本研究在管内开展高密度地震映像生产试验时,为减小不同检波器与炮点间的影响,偏移距根据实际效果设置为 5.0 m。经过近 1 个月的试验,最终得到了 3 段典型的 PCCP 管道高密度地震映像剖面,分别位于北京惠宁段的 15#排气阀井段、19#排气阀井段及 21#排气阀井段,剖面成果见图 5,具体解释如下:

1) 15#排气阀井段,全长 581 m,除测线末端的钢衬段管道表现为强波形信号外,还主要存在 2 处较明显的连续强波形异常信号,分别位于测线 325~355 m 及 420~490 m 附近,表现为 7~8 ms 区间的强波形异常;在测线 420 m 附近,还表现为更显著的强波形信号,波形异常反映了对应区域存在基础薄弱或不密实的可能。

2) 19#排气阀井段,全长 545 m,是本次检修工程中重点排查的管段,从剖面成果来看,主要存在 3 处较明显的连续异常信号,分别位于测线 10~60 m、260~310 m 及 460~490 m 附近,表现为 7~8 ms 区间的强波形异常且传播时域均较长,较突出地反映了该井段对应区域存在基础薄弱或不密实的可能。



a—15#排气阀井段剖面;b—19#排气阀井段剖面;c—21#排气阀井段剖面

a—test results of No. 15 vent valve well section;b—test results of No. 19 vent valve well section;c—test results of No. 21 vent valve well section

图 5 PCCP 管道高密度地震映像剖面成果

Fig. 5 Results of High-density Seismic Imaging at the PCCP

3)21#排气阀井段,全长 680 m,除测线末端的 2 处钢衬段管道表现为强波形信号外,还主要存在 2 处较明显的连续异常信号,分别位于测线 100~150 m 及 360~420 m 附近,表现为 7~8 ms 区间强波形异常,反映对应区域存在基础薄弱或不密实的可能。

上述管段于 2020 年初相继进行了开挖修复,经施工及测量专业反馈,对应管道内多分布纵向贯穿性裂隙,局部位置还存在管体环向裂缝,且在异常管节及相邻管段存在轻微不均匀沉降,局部垫层级配较差,回填土不致密,与文中探测位置解析成果吻合较好,起到了指导施工修复的作用,也为 PCCP 管内裂缝密集发育及断丝成因提供一种可能的影响因素分析。

4 讨论与认识

通过对南水北调北京惠宁段 PCCP 管道的物探试验进行分析和总结,得到如下认识:

1)通过面波法获得了 PCCP 管底层状结构的面波相速度分布特征,对于本工程后续设计及检测工作,提供了重要的物性基础;

2)在 PCCP 管内开展的高密度地震映像试验得到了丰富的波形信息。通过分析波形的同相轴特征,总结了 PCCP 管道在不同垫层环境下的波形反应。同时,基于各管段开展的生产试验,在管壁病害及基础不密实区域,均可见较明显的波形同相轴异

常,主要表现为 7~8 ms 附近较连续的强振幅、慢衰减信号。

3)经过实践验证,该技术和思路是切实可行的,也为国内 PCCP 管道缺陷探测提供了宝贵经验。

参考文献(References):

[1] 胡少伟. PCCP 在我国与实践与面临问题的思考[J]. 中国水利, 2017(18): 25-29.
Hu S W. Considerations on practice and problems of PCCP in China [J]. China Water Resources, 2017(18): 25-29.
[2] 黄涛,冯少孔,朱新民,等. 基于横波冲击映像法的水闸底板脱空缺陷检测[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 134-140.
Huang T, Feng S K, Zhu X M, et al. Void detection of sluice floor based on shear-wave impact imaging method [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 134-140.
[3] 陈实,刘云祯,李延清,等. 综合物探技术在城市活动断裂调查中的应用——以乌鲁木齐八钢石化断裂为例[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(4): 1584-1591.
Chen S, Liu Y Z, Li Y Q, et al. Application of integrated geophysical techniques in investigation of urban active faults: Take Urumqi Bagangshihua fracture as an example [J]. Progress in Geophysics, 2019, 34(4): 1584-1591.
[4] 吴怡洁,王慧,詹少全,等. 地震映像法和探地雷达法在城市地质勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(6): 910-914.
Wu Y J, Wang H, Zhan S Q, et al. Application of seismic imaging method and Ground Penetrating Radar method to urban geological explor [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16

(6):910-914.

[5] 袁桂琴,熊盛青,孟庆敏,等. 地球物理勘查技术与应用研究[J]. 地质学报,2011,85(11):1744-1805.

Yuan G Q,Xiong S Q,Meng Q M,et al. Application research of geophysical prospecting techniques [J]. Acta Geologica Sinica, 2011,85(11):1744-1805.

[6] 朱德兵,刘成君,章游斌,等. 近地表地震映像剖面静校正探析[J]. 物探与化探,2018,42(1):206-212.

Zhu D B,Liu C J,Zhang Y B,et al. Analysis of static correction of near-surface seismic image [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(1):206-212.

[7] 徐佩芬,李传金,凌甦群,等. 利用微动勘察方法探测煤矿陷落柱[J]. 地球物理学报,2009,52(7):1923-1930.

Xu P F,Li C J,Ling S Q,et al. Mapping collapsed columns in coal mines utilizing Microtremor Survey Methods [J]. Chinese Journal of Geophysics,2009,52(7):1923-1930.

[8] 林万顺. 多道瞬态面波技术在水利及岩土工程勘察中的应用[J]. 工程勘察,2000(4):38-40.

Lin W S. Application of multi-channel transient surface wave technology in water conservancy and geotechnical engineering investigation [J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2000(4):38-40.

[9] 贾辉,何正勤,陈义军,等. 多道瞬态瑞利波法场地数据采集参数实验[J]. 物探与化探,2010,34(4):553-556.

Jia H,He Z Q,Chen Y J,et al. Tests on field data acquisition parameters in MASW [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2010,34(4):553-556.

[10] 李万伦,田黔宁,刘素芳,等. 城市浅层地震勘探技术进展[J]. 物探与化探,2018,42(4):653-661.

Li W L,Tian Q N,Liu S F,et al. Progress in the study of shallow seismic exploration technology in urban areas [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2018,42(4):653-661.

[11] 聂碧波,赵建明,酆逸根,等. 浅层地震勘探在城市活断层探测中的应用[J]. 工程地球物理学报,2015,12(1):15-21.

Nie B B,Zhao J M,Li Y G,et al. The comprehensive application of shallow seismic prospecting method to urban active fault detection [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics,2015,12(1):15-21.

[12] 杨天春,肖巧玲. 多层层状介质的瑞利面波频散特性[J]. 物探与化探,2009,33(3):299-303.

Yang T C,Xiao Q L. Dispersion characteristics of Rayleigh waves in multilayered media [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2009,33(3):299-303.

[13] 杨成林. 瑞雷波法勘探原理及其应用[J]. 物探与化探,1989,13(6):465-468.

Yang C L. The theory and application of Rayleigh wave exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,1989,13(6):465-468.

[14] 黄真萍,刘振干. 瞬态振动法瑞雷面波采集质量的探讨与分析[J]. 物探与化探,2005,29(2):179-182.

Huang Z P,Liu Z G. A discussion on collection quality in the transient rayleigh wave vibration method [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2005,29(2):179-182.

[15] 刘云祯. 工程物探新技术[M]. 北京:地质出版社,2006.

Liu Y Z. New technology of engineering geophysical prospecting [M]. Beijing:Geological Publishing House,2006.

[16] 林万顺. 高密度地震映像在南干渠回填垃圾坑中的应用研究[J]. 地球物理学进展,2013,28(5):2773-2880.

Lin W S. Investigation of seismic imaging in south main canal backfill garbage pit [J]. Progress in Geophysics,2013,28(5):2773-2880.

Application of shallow seismic exploration technique in defect detection of PCCP used in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project

MA Guo-Kai,WEI Ding-Yong,LIU Ai-You,LIN Wan-Shun
(Beijing Institute of Water,Beijing 100044,China)

Abstract: Prestressed Concrete Cylinder Pipe (PCCP) is used in the Huining section in Beijing in the middle route of the South-to-North Water Transfer Project. After having worked for a long period,the PCCP pipelines have successively suffered the damage of wire breakage,concrete cracking,and local uneven subsidence. Aiming at the common engineering geological defects of the PCCP pipelines used in the Huining section,this study carried out shallow seismic tests based on the high-density seismic imaging exploration and the Rayleigh wave method. As a result,the physical properties of the PCCP and cushion areas were obtained,accurate troubleshooting of the fractures developing on the pipe wall and geologically uncompacted areas were performed, thus providing valuable experience for the investigation of the damages to PCCP.

Key words: South-to-North Water Transfer Project;Prestressed Concrete Cylinder Pipe;shallow seismic exploration technique;high-density seismic imaging;Rayleigh wave method