

震源车地震勘探技术在西安地裂缝 勘探中的试验研究^①

李忠生¹, 左兆龙¹, 高虎艳², 袁洪克³, 纪 鹏⁴, 宋彦辉¹, 程 耀¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安市地下铁道有限责任公司, 陕西 西安 710021;
3. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002; 4. 江苏省地质勘查技术院, 江苏 南京 210049)

摘要:为克服巨大的城市环境干扰, 采集高质量的人工地震勘探数据, 将大吨位震源车引入到西安地裂缝人工地震勘探中, 并在真实城市道路环境下对已知地裂缝进行多项试验, 包括抗干扰效果、勘探深度、震源工作参数、垂直叠加次数、不同主频检波器接收、勘探排列长度、最佳反射波接收窗口等, 最后将人工地震勘探结果与钻探结果进行验证对比。结果表明, 大吨位震源车在实际道路干扰环境下可以得到理想的地震反射剖面, 剖面中地裂缝异常明显, 推测解释的地裂缝在地面的位置可信。

关键词: 人工地震勘探; 西安地裂缝; 可控震源车

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)04-0915-04

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.04.0915

Test Study on Application of Vehicle-mounted Vibrator in the Seismic Exploration of Ground Fissures in Xi'an

LI Zhong-sheng¹, ZUO Zhao-long¹, GAO Hu-yan²,
YUAN Hong-ke³, JI Peng⁴, SONG Yan-hui¹, CHENG Yao¹

(1. School of Geology Engineering and Geometrics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Xi'an Metro Co., Ltd., Xi'an 710021, Shaanxi, China; 3. Geophysical Exploration Center, CEA, Zhengzhou 450002, Henan, China;
4. Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210049, Jiangsu, China)

Abstract: To obtain high quality data in seismic prospecting for ground fissure exploration in Xi'an, it is necessary to determine ways of overcoming interference from the city environment. In this respect, this study introduces application of a large-tonnage vibrator. A number of experiments were conducted using previously determined ground fissures in a city road environment, and the following were determined: the anti-interference effect, exploration depth, vibrator function parameters, vertical stack effect, different inherent-frequency geophone receiving effects, length of survey line, and the best reflection wave receiving window. Exploration results were verified using a geological drilling profile, and they show that by using a large-tonnage vibrator in city roads, it is possible to obtain an ideal seismic stack profile from the seismic reflection profile, thereby determining ground fissure abnormalities. In this way, the position of ground fissures can be interpreted by seismic exploration.

Key words: seismic exploration; Xi'an ground fissure; vehicle-mounted vibrator

① 收稿日期: 2015-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972215); 西安市地下铁道有限责任公司工可研项目(D6-KC-062013001)

作者简介: 李忠生(1964—), 男, 教授, 地球物理专业, 从事人工地震勘探技术的教学与研究工作。E-mail: lizhsh@chd.edu.cn。

0 引言

西安地裂缝是世界上最著名的城市地质灾害之一,其分布之广泛、活动之剧烈、致灾之严重在世界范围尚属少见。自上世纪 50 年代以来,在西安城区发现的地裂缝多达 14 条,面积约 155 km^2 ,总体走向 $\text{NE } 70^\circ \sim 80^\circ$,各地裂缝带间呈 $1 \sim 1.5 \text{ km}$ 似等间距排列;地裂缝向东西两侧延伸,东过灞河,西过皂河。西安地裂缝已构成城市建设的主要地质灾害,主要体现在毁坏建筑、错断地下线状工程、损毁城市道路等。

近 40 年的研究成果表明西安地裂缝属临潼—长安断裂带上盘的一组低序次断裂,并且在过量开采地下承压水而产生不均匀地面沉降的基础上发育为西安地裂缝灾害。这些引发西安地裂缝的低序次断裂具有同生断层性质,即断裂处地层愈深断距愈大^[1-3],地下 $10 \sim 15 \text{ m}$ 深处的地层错断约 $2 \sim 3 \text{ m}$,深度 100 m 附近的断距大于 10 m ,深度 1000 m 附近的断距可达 100 m 以上。正是由于西安地裂缝具有同生断层性质,才使得地球物理勘探,特别是人工地震勘探技术具有准确查明隐伏地裂缝的可行性。

将人工地震勘探技术应用于西安地裂缝研究中始于上世纪 80 年代,并取得了良好效果^[4]。此后,人工地震勘探手段曾大量应用到各种与构造地裂缝有关的研究及工程场地勘察中^[5-6]。早期野外地震数据采集所用震源多为炸药,但随着炸药使用的管控越来越严格,以及作业地点多位于城市,炸药震源基本被锤击、落重及震源车等非爆炸震源所替代。本文依托西安地铁工程建设,尝试使用大吨位震源车进行西安地裂缝的人工地震反射波勘探,并将勘探结果与钻探结果进行验证,以评判勘探效果。

1 人工地震勘探设备选取

地震勘探数据采集设备选用德国 DMT 公司生产的 SUMMIT 遥测数字地震仪。该仪器具有抗干扰能力强、灵敏度高、动态范围大的优点;仪器本身具有较强的数据采集系统,内设灵活多变的排列监视、数据监控和各种测试功能,使得现场可随时监视记录质量和设备工作状态,从而保证了数据采集的可靠性。震源车为美国 Metr 公司生产的 18 吨 M18/612 型可控震源,可实现连续变频扫描,其震源工作方式和扫描参数等可根据现场情况设定。检波器采用 3 个一组的接收方式,以尽可能提高地震

资料的信噪比和分辨率。图 1 为采集作业现场照片。



图 1 人工地震勘探现场工作照片

Fig.1 Photo of field seismic exploration

2 地裂缝人工地震勘探试验内容

结合西安地铁建设情况,试验场地选在西安的丈八八路 f_8 地裂缝处。丈八八路为城市道路,位于西安市的西南方向,道路笔直,车流量偏少,便于施工。其地貌属皂河、沣河一级洪积台地,区域内地势平坦。地层自上而下为第四系全新统、更新统冲洪积粉质黏土夹砂层透镜体,第四系厚度约 1 km 。地下水位 $10 \sim 15 \text{ m}$ 。地面调查结果显示, f_8 地裂缝穿越丈八八路,地面微地貌特征明显,但未见西安地裂缝活动迹象,目前该段地裂缝处于隐伏状态。

试验测线沿丈八八路布设,长度约 2 km , f_8 地裂缝基本位于测线中间。人工地震勘探试验内容主要包括:大吨位可控震源在人来车往的城市道路环境下的抗干扰效果,震源车扫描频带和扫描长度组合,垂直能量叠加效果对比及勘探深度、不同主频检波器接收对比、勘探排列长度、最佳反射波接收窗口等测试和试验,最后将人工地震反射波勘探解释结果与钻探结果进行验证对比。这些试验内容渐次实施,一些试验是在前面取得成功的基础上再实施深入。

试验中最先涉及的是观测系统,鉴于以往的西安地裂缝勘探经验及相关规程中与地裂缝人工地震勘探有关的规定^[7],初步设计的接收道间距为 3 m 、 300 道接收,其他参数待现场相关试验后再定。

测线布设完毕后,在接下来的震源试验中对震源车的连续变频扫描频带及扫描长度参数进行了不同组合测试,扫描频带分别为 $15 \sim 110 \text{ Hz}$ 、 $20 \sim 150 \text{ Hz}$ 、 $30 \sim 200 \text{ Hz}$,扫描长度分别为 8 s 和 12 s 。试验表明,扫描频带设定 $30 \sim 200 \text{ Hz}$,扫描长度设定为 8

s 比较合适。在进行震源车参数组合试验期间,还对不同主频检波器进行了简单试验,在同一接收排列中分段穿插使用 28 Hz 和 60 Hz 检波器,都使用 3 个一组的接收方式进行对比试验。对比表明,在接收有效波能量方面二者差别不明显,但在抗低频干扰方面 60 Hz 组合检波器更胜一筹。

由于震源车单次激发能量偏弱,需进行垂直能量叠加。因此,在 300 道接收的情况下分别进行了 1、2、4、8、12、16 次的垂直叠加试验。对比结果显示,8 次以上叠加的有效波能量非常明显,而 12 次与 16 次的效果差别不大,故确定每个炮点的垂直叠加次数不低于 12 次,并以接收到高信噪比的有效波为原则。

现场零偏试验测线的接收道间距 3 m,接收道为 300,记录长度 2 s,采样间隔 0.5 ms,检波器为 60 Hz,3 个一组方式接收,震源扫描频带及扫描长度为 30~200 Hz/8 s。图 2 为垂直叠加 12 次的零偏试验记录图。试验过程中路面车辆通行正常,因地表客观因素,记录中虽有些接收道缺失,但并不影响整个试验结果。从图中可以看出,反射波同相轴清晰且丰富,可识别的双程反射时间最大约为 1 500 ms,在炮检距 750 m(接收道 1~250)范围内的反射波能量较强,双程反射时间 900~1 100 ms 处有连续性较好的反射震相,对应深度大约 1 000 m,完全满足地裂缝勘探深度要求^[7]。零偏试验结果表明,大吨位可控震源车与数字地震采集站相结合的人工地震勘探技术,在城市道路干扰环境下可取得良好的抗干扰效果。

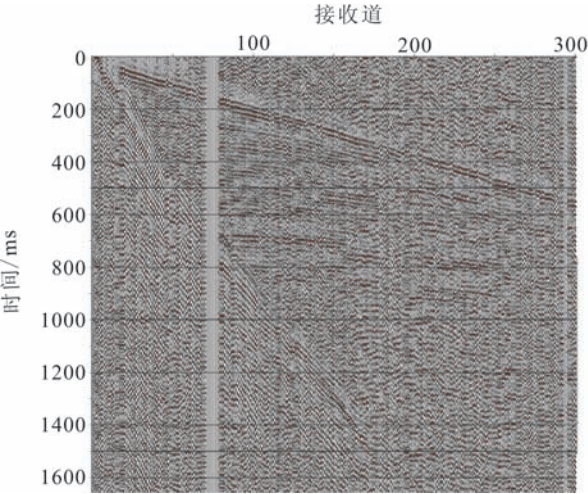


图 2 现场零偏记录图
Fig.2 Zero-offset field record

在此基础上,考虑到深浅兼顾的目标,确定的最

佳反射波接收窗口为炮检距 0~480 m,据此确定的试验观测系统为 240 道接收,道距 3 m,炮距 12 m,观测覆盖次数 30,剔除近炮点直达波干扰道,实际覆盖次数约为 24~26 次;炮点位于排列中为不对称形式激发,一侧为 80 道,另一侧为 160 道,单炮记录如图 3 所示。从图 3 可以看出,炮点两侧反射波同相轴清晰、丰富,炮点左侧 80 道主要反映中浅部地层信息,右侧 160 道则主要反映中深部地层信息。

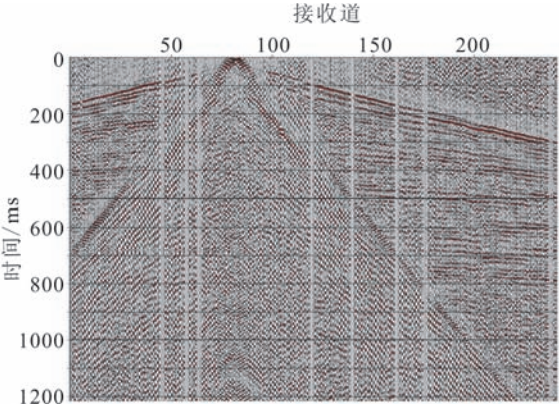


图 3 单炮记录图
Fig.3 Seismic exploration record (single short)

经过对采集的数据进行细致处理,得到如图 4 所示的地震反射叠加时间剖面图。从图中可以看出,剖面具有较高的信噪比,双程走时 1 200 ms 的反射波组清晰可见;剖面从上到下至少有 5 组强反射波组($T_1 \sim T_5$),各强波组间还有丰富的弱反射波组可以连续追踪;经对剖面分析,在 CDP620 附近从上到下明显存在反射波组不连续异常,该异常为一视倾向南的断层。该断层不仅错断了 $T_1 \sim T_5$ 反射波组,还具有深部断距明显大于上部断距的特征。 T_1 波组(~ 200 ms)附近断距大约为 20 m(双程走

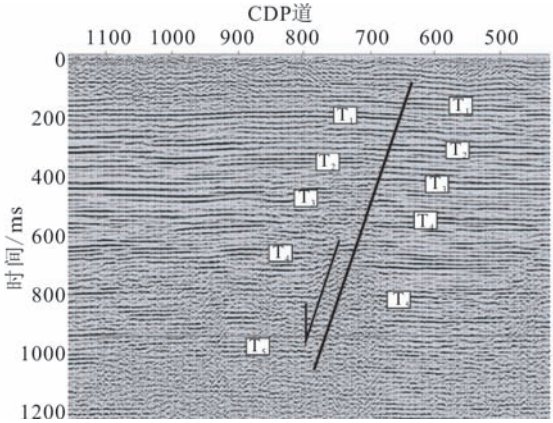


图 4 地震反射叠加时间剖面图
Fig.4 Stacked time section of seismic reflection profile

时相差约 20~30 ms),而在 T_5 波组(900~1 000 ms)处,断层两侧的断距增至 100 m 左右(双程走时相差约 100 ms)。另外,断层在 T_1 波组以浅错断了近地表反射同相轴,可分辨的上断点埋深约为 30~35 m;从断点延伸趋势及浅部弱反射波较乱的特征分析,该断点有继续向地表延展的可能。根据剖面推算,该断层倾向总体约为 $73^\circ\sim 78^\circ$ 。综合推断,剖面中的断层异常为西安地裂缝 f_8 。

根据已有的 f_8 地裂缝资料一测线西侧约 5 m 处非机动车道的地质钻探剖面^[8],该处地裂缝造成古土壤标志层(图 5 中③)错断 2.17 m(图 5)。钻探确定的地裂缝地面位置与人工地震勘探推算的地面位置小于 10 m,两者吻合良好。

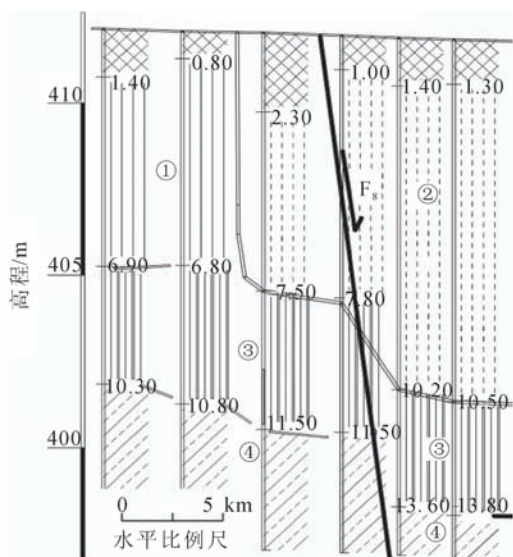


图 5 丈八八路 f_8 地裂缝钻探剖面图(③为古土壤标志层)

Fig.5 Drilling profile of ground fissure f_8 in Zhangbaba Road (③ is paleosol stratum)

3 结论

(1) 使用大吨位可控震源车的人工地震勘探技术,可有效压制城市道路行驶车辆等干扰,获得较高信噪比的原始记录,适合在城市环境条件下开展人工地震勘探工作。

(2) 通过合理设置相关参数,大吨位震源车的勘探深度可达约 1 000 m,满足西安地裂缝勘探深度要求;叠加剖面中反射波组丰富连续,地裂缝异常明显。

(3) 经与钻探结果对比,使用人工地震反射波勘探技术确定地裂缝异常及位置可信度高,可推广到今后的构造地裂缝勘察中。

参考文献(References)

- [1] 张家明. 西安地裂缝研究[M]. 西安:西北大学出版社,1990.
ZHANG Jia-ming, Research on Ground Fissures in Xi'an City [M]. Xi'an: Northwest University Press, 1990. (in Chinese)
- [2] 李永善,等. 西安地裂缝及渭河盆地活断层研究[M]. 北京:地震出版社,1992.
LI Yong-shan, et al. Research on Ground Fissures in Xi'an Region and Active Faults in Weihe Basin [M]. Beijing: Seismological Press, 1992. (in Chinese)
- [3] 彭建兵. 西安地裂缝灾害[M]. 北京:科学出版社,2012.
PENG Jian-bing, et al. Xi'an Ground Fissures Disasters [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [4] 唐大荣,雷伟,彭成. Mini-Sosie 浅层高分辨反射波技术在西安市地裂缝研究中的应用[J]. 地球物理学报,1988,31(6):708-712.
TANG Da-rong, LEI Wei, PENG Cheng. Mini-Sosie Shallow Reflection Technique with High Resolution and Its Application for Investigation the Ground Fissures in Xi'an City [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1988, 31(6): 708-712. (in Chinese)
- [5] 刘玉海,陈志新,倪万魁,等. 大同城市地质研究[M]. 西安:西安地图出版社,1995.
LIU Yu-hai, CHEN Zhi-xin, NI Wan-kui, et al. Research on Datong City Geology [M]. Xi'an: Xi'an Map Press, 1995. (in Chinese)
- [6] 李忠生. 西安地裂缝勘察中的地震勘探[J]. 工程勘察, 2004 (5): 64-67.
LI Zhong-sheng. Seismic Exploration in Xi'an Ground Fissures Prospecting [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2004 (5): 64-67. (in Chinese)
- [7] DBJ61-6-2006, 西安地裂缝场地勘察与工程设计规程[S]. 西安:陕西省建筑标准设计办公室,2006.
DBJ61-6-2006, Specification for Site Investigation and Engineering Design on Xi'an Ground fractures [S]. Xi'an: Shaanxi Provincial Construction Standard Design Office Press. (in Chinese)
- [8] 西安长安大学工程设计研究院有限公司. 西安市地铁六号线工可阶段沿线地裂缝勘察报告[R]. 西安:西安长安大学工程设计研究院有限公司,2013.
Xi'an Chang'an University Engineering Design and Research Co. Ltd. Investigation Report on Ground Fissures along Xi'an Metro No.6 at the Feasibility Study Stage [R]. Xi'an: Xi'an Chang'an University Engineering Design and Research Co. Ltd., 2013. (in Chinese)