

文章编号:1006-2106(2014)08-0078-06

浅层地震反射波法勘探在地裂缝勘察中的应用^{*}

章振华^{**}

(中铁二院西安勘察设计研究院有限责任公司, 西安 710054)

摘要:研究目的:西安地裂缝是一种地区性的灾害地质现象,已对西安城市建设构成危害。为了查明西安市地铁 6 号线沿线地裂缝的分布及其与线路的关系,从而为确定地铁 6 号线走向、车站位置、敷设方式及工法等提供地裂缝基础资料。三类地裂缝场地勘察难度大,目前还没有成熟的经验。为了地裂缝钻探具有针对性,减少钻探量,从而提高勘察质量,加快勘察进度,沿线路布设人工地震勘探,以便从深部确定地裂缝,为地面地裂缝钻探提供指导性依据。

研究结论:(1)本文针对三类地裂缝场地的复杂性,先采用 18 t 的震源车进行人工浅层地震反射波法勘探,然后在地震异常处进行钻探验证,查出地裂缝;(2)地震勘探试验表明,物性差异明显,所解译的地裂缝位置与钻探结果吻合较好,是有效可信的手段之一;(3)在城市道路环境下使用大吨位的震源车,抗干扰效果好,勘探精度、深度均达到了预期要求,可以在地裂缝勘察中推广运用;(4)本研究成果对隐伏断裂勘察也具有示范和指导意义。

关键词:地铁;人工浅层地震反射波法;大吨位震源车;地裂缝勘察

中图分类号:P642.26 **文献标识码:**A

Application of the Shallow Seismic Reflection Wave Survey and Prospecting in Ground Fissure Investigation

ZHANG Zhen - hua

(Xi'an Survey and Design Institute Co. Ltd, China Railway Eryuan Engineering Group, Xi'an, Shanxi 710054, China)

Abstract: **Research purposes:** Xi'an ground fissure is a regional disaster geological phenomena, already constitute a hazard to the Xi'an City. In order to identify the distribution of the ground fissures along Xi'an metro line 6 and its relationship with the line, so as to provide basic information for determining the metro line, station location and construction method of laying the ground fissures. The investigation of three types of ground fissures site is difficult, and there is no mature experience. In order to make ground fissure drilling targeted, reduce the amount of drilling, thereby improve the quality of the survey, accelerate the survey progress along the line laid artificial seismic exploration in order to determine the crack from deep and provide guidance for the ground fissure drilling.

Research conclusions: (1) In this paper, as to complexity of the three types of ground fissures site, first use 18 tons of artificial shallow seismic source seismic reflection prospecting, second drill and verify seismic anomalies, to find out the ground fissures. (2) Seismic tests showed the ground fissures positions which are interpreted by the obvious physical differences agree well with the drilling results. It is one of the effective and credible means. (3) The use of large tonnage vibrator vehicle under urban road environment, interference effects, exploration accuracy and depth have reached the expected requirements, which can be used in the ground fissure investigation. (4) It is also a demonstration and guidance on the survey of concealed fault.

Key words: subway; artificial shallow seismic reflection wave; large tonnage vibrator vehicle; ground fissure investigation

^{*} 收稿日期:2014-01-18

^{**} 作者简介:章振华,1965 年出生,男,高级工程师。

1 工程概况

西安市地铁6号线一期工程起于南客站,止于劳动南路站。一期工程线路全长20.262 km,均为地下线;设车站15座(其中换乘站7座),最大站间距2.56 km,最小站间距0.88 km,平均站间距1.395 km;设车辆段一座。

1.1 西安地裂缝概况

西安地裂缝是世界上最著名的城市地质灾害之一,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,均分布在黄土梁洼地貌范围内,面积达155 km²,与地面沉降范围基本一致,总体走向NE70°~80°,各地裂缝带间呈1~1.5 km似等间距排列,地裂缝向东西两侧延伸,东过灞河,西过河。西安地裂缝已构成城市建设的主要地质灾害。

根据地裂缝场地勘探标志层的不同,地裂缝场地可分为一类、二类、三类。地表层是一类场地的勘探标志层;上更新统和中更新统红褐色古土壤是二类场地的勘探标志层;三类场地的勘探标志层有两种:(1)埋藏深度40~80 m的中更新统河湖相地层;(2)60~500 m深度内可连续追索的六个人工地震反射层组。

1.2 探区概况

地铁6号线锦业二路以南(西太路)地貌属沣河、皂河一级阶地,地势平坦,地面高程409~425 m。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。第四系地层厚度约1 000 m,地下水位埋深10~20 m。根据西安地裂缝研究成果及其发育规律,该区域可能存在数条地裂缝,地面未见地裂缝活动迹象,目前处于隐伏状态。

2 勘察目的

由于三类地裂缝勘探场地的复杂性,勘察难度大,目前国内外尚没有成熟的勘探方法,故在地裂缝异常识别上难度较大。通过论证决定先采用人工地震手段进行普探,主要目的是查出地铁6号线沿线地裂缝异常点,然后在地震异常处通过传统的钻探手段验证确认,从而找到地裂缝的位置及分布情况,为地铁穿越地裂缝的设防、地铁隧道设计和施工提供依据。

为了研究确定人工地震勘探合理的仪器参数和观测系统,先在相同地貌单元的已知地裂缝地段进行物探试验,选择合理的工作参数并取得良好效果后,再实施地铁6号线(西太路)地裂缝地震勘探。经过仔细比选,将穿越丈八八路的 f_8 地裂缝作为人工地震勘探的试验段,该段 f_8 地裂缝已知,地层、地貌等与西太路的

相似,处于沣河、皂河一级阶地,地势平坦,地面高程406~416 m。地下水位埋深6~10 m。

3 人工地震勘探仪器设备的选择

地震勘探是利用地下介质弹性和密度的差异,通过观测和分析大地对人工激发地震波的响应,推断地下地层的性质和形态的地球物理勘探方法。

根据测区周边环境条件,地震波激发源选用了美国Metz公司生产的M18/612型(18 t)可控震源,在国内首次将大吨位震源车用于地裂缝勘察。通过仪器对采集信号的有效处理,最大限度地压制干扰,提高信噪比。同时,根据现场地震记录质量情况,每个震点(激发点)灵活实施不同次数的垂直迭加,以达到最佳效果。

数据采集设备采用德国DMT公司生产的具有高抗干扰能力、高灵敏度、大动态范围的SUMMIT遥测数字地震仪。观测电缆采用了基于Click & on技术的双芯数字传输电缆,以提高数据传输过程中的抗干扰能力。

为了提高地震检波器的灵敏度,尽可能地压制低频干扰噪声以提高地震资料的信噪比和分辨率,每个测点上使用3~4个高频检波器组合接收。

4 选择仪器工作参数和观测系统

丈八八路 f_8 地裂缝地震勘探试验主要包括: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(含垂直叠加效果)试验;大吨位可控震源勘探深度试验;采集仪器参数(如采样间隔、记录长度等)的选取试验;设计的道间距(3 m)、组合检波器在地裂缝勘探中的效果;最大勘探排列长度的测定;最佳反射波接收窗口的测定;覆盖次数与最终勘探效果的试验;地裂缝倾角的测定;地震勘探解译地裂缝位置与实际地裂缝位置误差测试。

第一步:现场参数试验,选择合理的仪器参数和观测系统,即对仪器采集参数、震源激振参数、激发效果及观测系统等参数进行试验,试验测线长897 m,获得12炮记录。

第二步:对已知地裂缝(f_8)进行多次覆盖反射波地震勘探试验。试验采用30次覆盖反射波地震勘探观测系统,如图1所示。测线沿丈八八路布设,总长2 001 m。 f_8 地裂缝位于测线中部,地裂缝两侧满覆盖剖面长度约200 m。

试验共采集记录162炮。对丈八八路试验段采集的数据处理解译后得到地震反射时间剖面图,如图2所示。从图中可以看出,剖面具有较高的信噪比,双

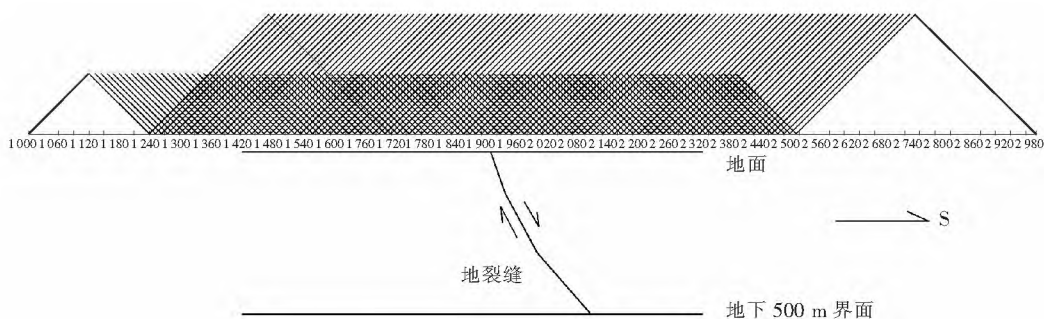


图1 试验测线观测系统图

程走时 1 000 ms 内的反射波组清晰可见;剖面反射波组丰富,从上到下有多组强反射波组,各波组间还有丰富的弱反射波组可以连续追踪。各强反射波组所揭示

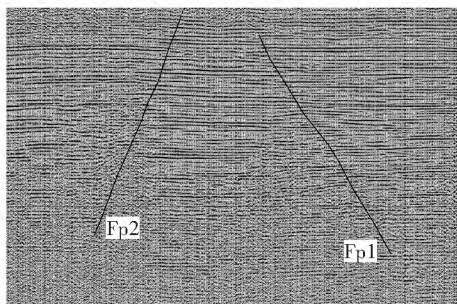


图2 丈八八路测线地震反射时间剖面图

的反射界面特征在总体上呈水平层状形态。从剖面形态看,各界面埋深较为稳定,没有大的起伏变化。在剖面桩号 720 m 和 912 m 两处,自上而下存在断点特征,分析认为是断层所致。

Fp1:对应地面位置在剖面桩号 720 m 附近,200 ms 以下各界面均出现不同程度的错断,主要表现为波组同相轴的错断。从各界面断点反映的断面形态上看,这是一个视倾向北的正断层,剖面上可分辨的上部断点埋深为 140 ~ 150 m。

Fp2:对应地面位置在剖面桩号 912 m 附近,自上而下各界面出现错断特征,表现为同相轴的规则错断,局部断点附近存在反射紊乱现象。从断面形态分析认为,此处存在一视倾向南的正断层,断层向上错断了近地表反射同相轴,可分辨的上部断点埋深为 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。

根据西安地裂缝均为南倾正断层性质,推断 Fp2 为地裂缝异常,该异常对应的地面桩号在 912 m 附近(如图 3 所示)。

根据丈八八路 f_8 地裂缝钻探剖面,该处地裂缝造成古土壤标志层错断 2.17 m(如图 4 所示)。图 3 中

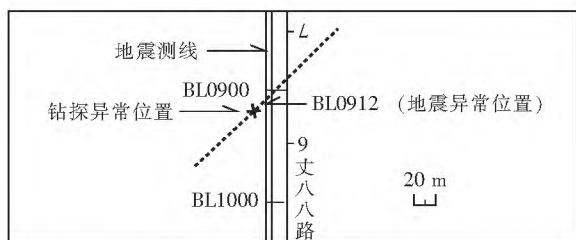
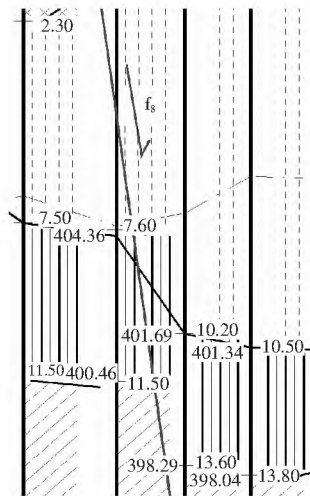


图3 地震异常与钻探异常平面图

的虚线为 f_8 地裂缝,从图中可以看出,地震勘探确定的地裂缝异常位置与钻探剖面控制的 f_8 地裂缝位置差距小于 10 m,两者吻合良好。

图4 f_8 地裂缝钻探剖面图

根据图 2 地震反射时间剖面图计算,该处 f_8 地裂缝倾角为 $73^\circ \sim 75^\circ$,与西安地裂缝的产状吻合。

5 西太路地裂缝勘探

在丈八八路试验段取得良好效果的基础上,对西太路进行人工地震勘探,共完成 2 条地震测线(XTL1 和 XTL2),测线长度 10 008 m,获得 650 炮记录,如表 1 所示。

表 1 地震勘探测线工作量及参数表

测线名称	道间距/m	接收道数	炮间距/m	覆盖次数	炮数	测线长度/m
ZBBL	3	300	—	—	12	897
ZBBL	3	240	12	30	162	2 001
XTL1	3	240	15	24	590	9 003
XTL2	3	240	15	24	60	1 005
合计	—	—	—	—	824	12 906

5.1 剖面分析与解译

5.1.1 XTL1 测线

经数据处理后得到 XTL1 测线时间剖面图(图 5),根据各波组错断及界面产状突变等特征,剖面上共画出 18 条断线(Fp3~Fp20)。

纵观整个剖面的 18 条断线异常,可以看出有些断点自上而下的地层错断特征明显,断线两侧地层形态

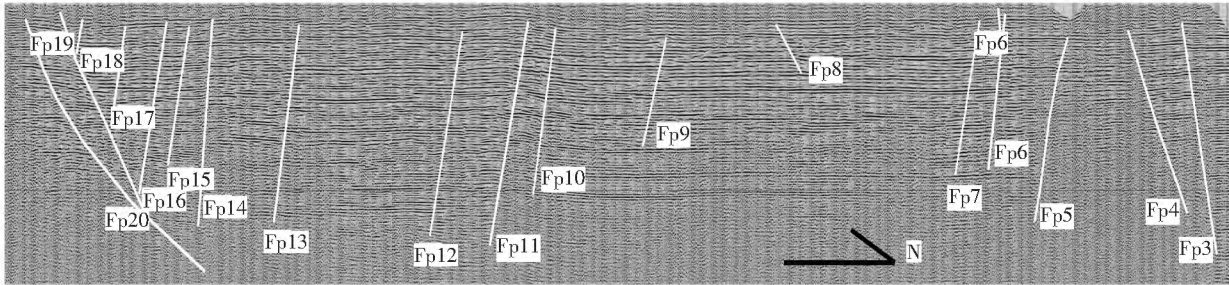


图 5 XTL1 地震测线反射时间剖面图

差异显著,并有可能延伸至近地表,而有些断点仅局限于剖面的部分深度,其上下地层连续性较好,无明显错断迹象。按照规模及其对近地表地层的影响程度,将它们分为Ⅰ类错断和Ⅱ类错断。Ⅰ类错断指错断特征明显,自上而下地层界面的断点可联系贯通,且错断极有可能延伸至近地表,对地铁 6 号线可能造成一定影响。Ⅱ类错断指错断特征较明显,但较Ⅰ类错断的弱,自上而下地层界面的断点联系贯通性不强或部分贯通,其上部或下部同相轴连续性较好,无明显错断迹象。各断线参数及类别如表 2 所示。

表 2 西太路地震测线(XTL1、XTL2)剖面断线参数一览表

测线号	断线序号	对应地面桩号/m	错断类型	视倾向
XTL1	Fp3	495	Ⅱ	N
	Fp4	900	Ⅱ	N
	Fp5	1 300	Ⅱ	S
	Fp6	1 750	Ⅰ	S
	Fp6'	1 810	Ⅰ	N
	Fp7	1 920	Ⅱ	S
	Fp8	3 480	Ⅱ	S
	Fp9	4 170	Ⅱ	S
	Fp10	4 980	Ⅱ	S
	Fp11	5 190	Ⅰ	S
	Fp12	5 640	Ⅱ	S
	Fp13	6 840	Ⅰ	S
	Fp14	7 490	Ⅰ	S
	Fp15	7 630	Ⅱ	S

续表 2 西太路地震测线(XTL1、XTL2)剖面断线参数一览表

测线号	断线序号	对应地面桩号/m	错断类型	视倾向
XTL1	Fp16	7 800	Ⅰ	S
	Fp17	8 080	Ⅰ	S
	Fp18	8 400	Ⅰ	S
	Fp19	8 600	Ⅰ	N
	Fp20	8 880	Ⅰ	N
XTL2	Fp21	550	Ⅱ	N

5.1.2 f ①地裂缝与 Fp6 断线解译

Fp6 断线位于剖面桩号 1 750 m 附近,错断特征表现为同相轴的错断,局部有界面产状的扰动变化。从断点形态来看,Fp6 为正断层,其上断点埋深在 100 ms 附近,并仍有向上延展的可能,可分辨的上断点埋深约为 105~110 m(如图 6 所示)。根据西安地裂缝均为南倾正断层性质,推断 Fp6 为地裂缝异常,该异常对应的地面桩号在 1 750 m 附近。

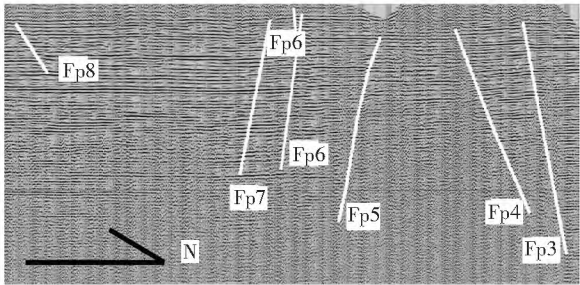


图 6 XTL1 地震测线北段反射时间剖面图

根据西太路 f①地裂缝钻探剖面,13[#] - 19[#] 钻孔以北和以南地层存在较明显的相位差,推测存在地裂缝异常(如图 7 所示)。人工地震勘探也清楚地表明该处存在构造异常。图 8 中的虚线为 f①地裂缝,从图中可以看出,地震勘探确定的地裂缝异常位置与钻探剖面控制的 f①地裂缝位置差距小于 10 m,两者吻合良好。

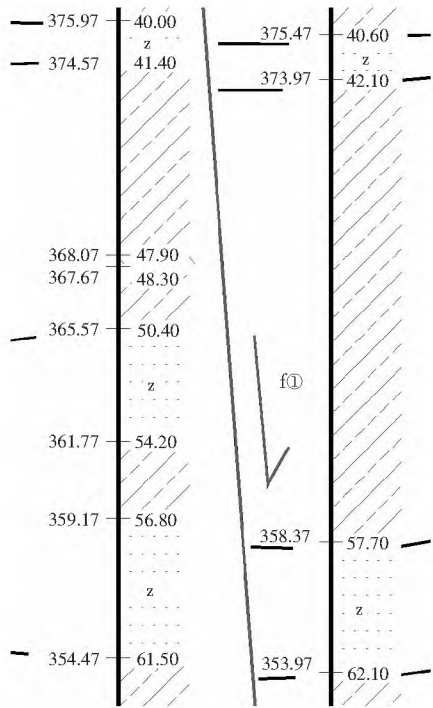


图 7 f①地裂缝钻探剖面图

根据图 6 地震反射时间剖面图计算,该处 f①地裂缝倾角为 75° ~ 80°,与西安地裂缝的产状吻合。

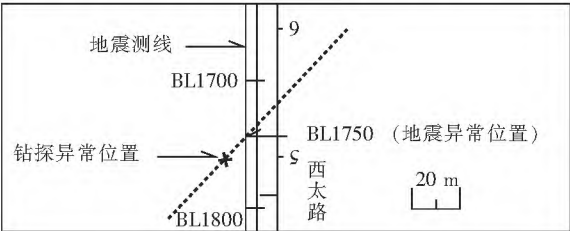


图 8 地震勘探异常与钻探异常平面位置图

6 项目完成情况及地裂缝判定结果

6.1 项目完成情况

本次人工地震勘探共完成 3 条测线,总长度 12 906 m,获得有效记录 812 张。经室内数据处理和解译,获得了高信噪比的反射波叠加剖面图,总结如下:

本次人工浅层地震反射波法勘探,为压制干扰、提

高资料的信噪比,地震波激发源采用了大吨位可控震源车。现场数据采集获得了信噪比较高的原始记录。试验达到了预期的效果,为地裂缝钻探指明了方向,大量减少了钻探,节约了勘察成本,加快了勘察进度,提高了勘察质量。

资料处理使用 FOCUS 地震反射数据处理系统,通过对原始地震记录进行处理,获得了信噪比较高的地震反射波叠加剖面,为分析隐伏断层的存在和展布特征提供了地震勘探证据。

在室内资料分析和解译中,依据工作区已有资料,取得了不同地震剖面上的地层展布以及断层特征等方面的信息。

6.2 地裂缝判定结果

在西太路测线上,经钻探确认,其中 6 条断线为西安地裂缝,分别为 f①、f②、f③、f④、f⑤、f⑥,地裂缝与地铁 6 号线(西太路)的交点坐标如表 3 所示。

表 3 地裂缝与西安市地铁 6 号线交点坐标汇总表

地裂缝 编号	地裂缝与地铁 6 号线 相交位置(地表位置)			精度 修正值 Δ <i>k</i> /m)	备注
	交点	相应坐标			
		<i>X</i>	<i>Y</i>		
f①	左线	-1 148. 181	2 867. 285	7. 90	西太路
	右线	-1 140. 245	2 880. 785	7. 90	
f②	左线	-4 180. 515	1 941. 652	3. 83	西太路
	右线	-4 167. 538	1 963. 730	3. 83	
f③	左线	-5 669. 167	1 154. 347	10. 44	西太路
	右线	-5 658. 163	1 176. 109	10. 44	
f④	左线	-6209. 753	867. 939	10. 07	西太路
	右线	-6200. 036	891. 127	10. 07	
f⑤	左线	-6389. 333	750. 182	7. 51	西太路
	右线	-6371. 050	791. 289	7. 51	
f⑥	左线	未相交			西太路
	右线	未相交			

7 结论

采用 18 t 震源车激发和遥测数字地震仪多道接收,可以得到理想的地震反射剖面,剖面中地裂缝异常明显,推测地裂缝在地面的位置可信。

(1)大吨位可控震源在城市道路环境下,具有良好的抗干扰效果,扫描参数为:30 ~ 200 Hz,扫描长度 8 s。一般垂直叠加 8 次即具有较好的效果。

(2)本次使用 18 t 可控震源勘探的双程反射时间可达 1 000 ~ 1 200 ms,对应深度约 1 000 m,满足地裂缝勘察方案中设定的勘探深度。

(3)从本次浅层地震勘探所获得的地震反射波叠加剖面来看,在剖面上存在有多组反射特征明显的地

层界面反射,且剖面信噪比较高,这为判定测线经过地段内的地层界面展布、判定地层反射波同相轴的错断,为钻探验证地裂缝提供了基础。

综上所述,人工浅层地震反射波法在西安市地铁6号线地裂缝勘察试验表明,物性差异明显,所解译的地裂缝位置与钻探结果吻合较好,说明人工浅层地震反射波法勘探在地裂缝勘察中是有效可信的手段之一,且在城市道路环境下使用大吨位的震源车,抗干扰效果好,可以在地裂缝勘察中推广运用,还可作为隐伏断裂勘察的参考。

参考文献:

- [1] 李永善,等. 西安地裂缝[M]. 北京:地震出版社,1986.
Li Yongshan, etc. Xi'an Ground Fissures [M]. Beijing: Seismological Press, 1986.
- [2] 唐大荣,雷炜,彭成. Mini - Sosie 浅层高分辨反射波技术在西安市地裂缝研究中应用[J]. 地球物理学报,1988(6):708 - 712.
Tang Darong, Lei Wei, Peng Cheng. Mini - Sosie High - Resolution Reflection Wave in Shallow Ground Fissures in Xi'an Research Application [J]. Acta Geophysics Sinica, 1988(6): 708 - 712.
- [3] 张天明. 西安地裂缝研究[M]. 西安:西北大学出版社,1990.
Zhang Jiaming. Xi'an Ground Fissures Research [M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1990.
- [4] 彭建兵,张骏,苏生瑞,等. 渭河盆地活动断裂与地质灾害[M]. 西安:西北大学出版社,1992.
Peng Jianbing, Zhang Jun, Su Shengrui, etc. Weihe Basin Active Faults and Geological Disasters [M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1992.
- [5] 耿大玉,李忠生. 中美两国的地裂缝灾害[J]. 地震学报,2000(4):433 - 441.
Geng Dayu, Li Zhongsheng. Sino - US Ground Fissures [J]. Acta Seismologica Sinica, 2000(4): 433 - 441.
- [6] 王景明. 地裂缝及其灾害的理论与应用[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2000.
Wang Jingming. Fissure and Disaster Theory and Application [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2000.
- [7] DBJ 61 - 6—2006,西安地裂缝场地勘察与工程设计规程[S].
DBJ 61 - 6—2006, Xi'an Ground Fissures Site Investigation and Engineering Design Rules [S].
- [8] TB 10013—2010,铁路工程物理勘探规范[S].
TB 10013—2010, Railway Engineering Physics Exploration Specification [S].
- [9] 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 & Research Institute. The Survey Report of Ground Fissures along Xi'an Metro Line 6 [R]. Xi'an Chang'an University Engineering Design Institute Co. Ltd, 2013.

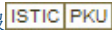
(编辑 赵立兰)

(上接第67页 From P. 67)

- [4] 李海峰. 卵石含量高、粒径大的富水砂卵石地层中盾构机选型研究[J]. 现代隧道技术,2009(1):57 - 63.
Li Haifeng. Design of a Shield Driving in Water - saturated Cobble and Sand Stratum with High Content of Large - grain Cobbles [J]. Modern Tunnelling Technology, 2009(1): 57 - 63.
- [5] 唐忠. 泥水盾构深井下组装始发与到达施工技术[J]. 隧道建设,2006(4):37 - 41.
Tang Zhong. Erection, Launching and Arrival Technology of Slurry Shield Machine in Deep Shafts [J]. Tunnel Construction, 2006(4): 37 - 41.
- [6] 周迎,丁烈云,周诚,等. 越江隧道工程泥水盾构适应性分析研究[J]. 铁道工程学报,2010(11):68 - 73.
Zhou Ying, Ding Lieyun, Zhou Cheng, etc. Analysis of Adaptability of Slurry Shield for Construction of River - crossing Tunnel [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010(11): 68 - 73.
- [7] 王梦恕,张成平. 城市地下工程建设事故分析及控制对策[J]. 建筑科学与工程学报,2008(2):1 - 3.
Wang Mengshu, Zhang Chengping, Analysis of Accident Induced by Urban Underground Project Construction and Its Control Measures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008(2): 1 - 3.

(编辑 吕洁)

浅层地震反射波法勘探在地裂缝勘察中的应用

作者: [章振华](#), [ZHANG Zhen-hua](#)
作者单位: [中铁二院西安勘察设计研究院有限责任公司, 西安, 710054](#)
刊名: [铁道工程学报](#) 
英文刊名: [Journal of Railway Engineering Society](#)
年, 卷(期): 2014, 31(8)

引用本文格式: [章振华](#). [ZHANG Zhen-hua](#) [浅层地震反射波法勘探在地裂缝勘察中的应用](#)[期刊论文]-[铁道工程学报](#) 2014(8)