

高密度面波勘探和小型台阵地脉动观测在西部地区地震防灾中的应用

冯少孔¹, 车爱兰¹, 吴志坚^{2,3,4}, 严武建^{2,3,4}, 陈豫津^{2,3,4}

(1. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 中国地震局黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 中国地震局兰州地震研究所, 甘肃 兰州 730000; 4. 甘肃省岩土防灾工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 鉴于我国西部地区地震防灾需要一种简便快速、低成本的地下构造调查方法, 本文利用对甘肃岷县漳县地震灾害科考机会, 对高密度面波勘探和小型台阵地脉动观测在西部山区地下构造调查中的有效性进行了试验。试验选取房屋倒塌和滑坡等不同灾害类型以及不同地质条件的场地进行; 2种方法的数据采集都使用普通小型便携式面波仪和4 Hz地震检波器, 其中, 小型台阵采用底边长16 m的正三角形台阵, 观测时间约30分钟。试验结果显示, 高密度面波勘探能够探测地下约30~40 m以内的剪切波速度构造, 小型台阵探测深度稍深, 约为40~50 m, 但是浅层分辨率较低。试验还显示, 两种勘探方法使用同一台普通面波仪和地震检波器, 设备小、成本低、便于携带, 非常适合西部地区地震防灾之地下构造调查。

关键词: 高密度面波勘探; 台阵地脉动观测; 频散分析; 地下构造; 地震防灾; 地震小区划

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-0844(2013)04-780-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2013.04.780

Application of Surface Wave Surveys and Array Microtremor Observations for Earthquake Disaster Mitigation in Western China

FENG Shao-kong¹, CHE Ai-lan¹, WU Zhi-jian^{2,3,4}, YAN Wu-jian^{2,3,4}, CHEN Yu-jin^{2,3,4}

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering of CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou Gansu 730000, China;

4. Geotechnical Disaster Prevention Engineering Technology Research Center of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Since a simple, fast, and low-cost method for investigating subsurface structures to prevent seismic disasters is needed in the western part of China, the authors have taken the opportunity to study the Gansu Mingxian Zhangxian $M_s 6.6$ earthquake and have conducted field tests for the effectiveness of surface wave surveys (SWS) and small size array microtremor observations. Sites having different geological conditions and having undergone different types of earthquake disasters, such as collapse of houses and landslides, were selected for the test. A portable seismic recorder and 4 Hz vertical component geophones were used for the acquisition of data for both surface wave surveys and small size array microtremor observations. Surface wave survey was done using a 24-receiver spread

收稿日期: 2013-09-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB013505); 国家自然科学基金项目(11372180, 40902094); 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费项目(2012IESLZ01)

作者简介: 冯少孔(1960-), 男(汉族), 山东临朐人, 硕士, 工程师, 主要从事地球物理勘探及土木工程检测的技术研发和教学工作。

with a 2 m receiver interval for 5 m, 10 m, 15 m, and 20 m source offsets. Small size array microtremor observations were done using a triangular array of 16 m for observation duration of 30 minutes. The results have shown that the SWS can become an effective method for the geological investigation of the low western area covered by loess and the low groundwater level. The thickness of the loess is large and the inner structure is simple, which provides favorable conditions for surface wave surveys. The depth of the survey is 30 m more due to the seismic energy sources from artificial hammering. High-frequency microtremors of more than 2 Hz can also be used for subsurface structure surveys in the mountainous rural areas for rare mechanical vibrations. Small size array microtremor observations need a small site and environmental requirements are not strict. The depth of survey is 30 m more using small size array microtremor observation, which is seen to be highly effective. The same types of equipments were employed for surface wave surveys and small size array microtremor observations, which improved the usage efficiency of the equipments. Small size array microtremor observations were done using a triangular array of 16 m and for observation duration of 30 minutes. The results have shown that surface wave surveys can estimate the shear wave velocity for structures down to a depth of 30~40 m, while the small size array microtremor observations can estimate down to a depth of 40~50 m. Small size array microtremor observations can explore slightly deeper but the resolution of shallow layers is lower. As the instrument is portable, the method is both simple and low-cost; hence, surface wave surveys and small size array microtremor observations are very suitable for the prevention of seismic disasters in the western region of China.

Key words: surface wave survey; array microtremor observation; dispersion analysis; subsurface structure; earthquake disaster mitigation; seismic microzonation.

0 引言

2013年7月22日7时45分在甘肃省岷县、漳县交界(北纬34.5°,东经104.2°)发生6.6级地震,震源深度20 km。地震造成95人死亡,5人失踪,1 001人受伤;紧急转移安置22.7万人,房屋倒塌2 754间,受灾人数达58.2万人,直接经济损失近27亿元。地震过后20天,中国地震局兰州地震研究所与上海交通大学组成联合地震科考队,对震中附近受灾最严重的岷县永星、永光、马家沟等村落进行了地震科考。科考从2013年8月12日进入灾区,8月18日离开灾区,共7天时间,其间除对房屋倒塌等情况等进行考察外,还考察了永光村滑坡等地震次生灾害,并使用携带的仪器,对房屋倒塌严重的场地进行了高密度面波勘探和台阵地脉动观测,其目的是搞清地下构造,为灾害成因分析提供基础资料。

地震防灾减灾的关键之一是做好地震小区划,提高地震灾害预测精度并制定与其相适应的防灾减灾计划。高精度的地震小区划离不开对地下构造的精准把握,鉴于我国西部山区表层地层变化大,广大的农村地区住户相对分散,地下构造调查工作量大,同时西部地区经济上属于后发展地区,需要一种简便快速、低成本的地下构造调查方法,高密度面波勘探和台阵地脉动观测是最受期

待的勘探手段。所以本次科考所进行的高密度面波勘探和小型台阵地脉动观测数据的分析结果对将来开展这方面的工作具有指导意义。

1 我国西部地震防灾工作特点

自2008年5月12日四川汶川发生大地震后,我国西部地区又接连发生了青海玉树地震(2010年4月14日),四川攀枝花地震(2008年8月30日),四川雅安地震(2013年4月20日)和甘肃岷县漳县地震(2013年7月22日)等 M_s6 以上的地震,给人民生命和财产带来了巨大损失。由表1可见,我国西部地区的地震,震源深度浅,即使震级不大也会带来较大的烈度,造成巨大的地震灾害,地震防灾形势严峻。

地震防灾的关键是完善地震小区划,提高灾害预测精度,并根据地震小区划制定有效的防灾减灾措施。高质量的地震小区划需要精确把握地下构造以及由此引起的场地效应,并对包括次生灾害在内的地震灾害做精确预测。从地貌特征上,我国西部多为山区,地震引起的滑坡等次生灾害严重,其中西北部地区多为被厚层黄土覆盖的土山,次生灾害以黄土型滑坡为主;西南部地区则以走俏的石头山为主,气候多雨,次生灾害以山体崩塌、泥石流等为主。制定有效的防灾减灾计划,不仅需要调查

表 1 近年来我国西部地区发生的主要地震一览表
Table 1 Major earthquakes occurring in western China in recent years

地震名称	时间	地震参数				灾情
		震中位置	震级/ M_s	震源深度/km	最大烈度	
甘肃岷县漳县地震	2013-07-22	甘肃省岷县、漳县交界处	6.6	20	Ⅷ	死亡: 95 人, 受伤: 1 001 人, 受灾损失 26.49 亿
四川省芦山地震	2013-04-20	四川省芦山县	7.0	13	Ⅸ	死亡: 196 人, 失踪: 21 人, 受伤: 11 470 人
青海玉树地震	2010-04-14	青海省玉树县	9.0	14	Ⅸ	死亡: 2698 人
四川攀枝花地震	2008-08-30	攀枝花东南 50 km	6.1	10	Ⅷ	死亡: 38 人, 受伤: 589 人
四川汶川地震	2008-05-12	四川省汶川县	8.0	10	XI	死亡: 69 227 人, 失踪: 17 923 人, 受伤: 374 643 人

地震场地效应,还需要对潜在的滑坡等可能的次生灾害进行地质调查;从工程地质条件上,山区表层地层变化大,广大的农村地区人口相对分散,这些都加大了地质调查的工作量;从经济发展水平上,西部地区是我国的经济后发展地区,因此需要一种简便快速和低成本的调查手法,所以从西部防灾的这些特点来考虑,高密度面波勘探和小型台阵地脉动观测是最可期待的勘探手法。

2 面波勘探和小型台阵地脉动观测方法简介

众所周知,当介质表面受到机械扰动时,会在介质中产生弹性波。弹性波除了常见的纵波(P波)和横波(S波)外,还有表面波,简称为面波。表面波又包括瑞雷面波(Rayleigh Wave)和勒夫面波(Love Wave),其中瑞雷面波产生于任意介质的表面附近,能量强,便于激发和接收,被广泛地用于各种检测和勘探,在一般情况下,如果不特别说明,面波勘探就是指瑞雷面波勘探。

瑞雷面波之所以被称为表面波是因为波动振幅沿深

度方向快速衰减,波动的绝大多数能量集中于介质表面以下半个波长的范围内,在一个波长深度以外,振幅几乎为零。显而易见,较高频率的面波波长较短,只能穿透地表附近很浅范围内的地层,因而其传播速度只反映浅层地下构造;较低频的面波波长很大,能穿透从地表到深部地层,因而其传播速度能反映从地表到深部地下构造的综合影响。面波的这一特性决定了面波在层状介质中传播时具有速度频散现象,亦即传播速度与波动频率有关。传播速度与频率的关系通常用相速度的概念表达,而根据波动理论,在层状介质中面波的相速度曲线可以由理论计算得到,因此,如果通过测量手段得到面波在介质中从低频到高频的传播速度(相速度曲线)就从物理上保证获取了反映从浅层到深部地下构造的信息,通过假定地下构造模型为层状介质,就可以通过反演的手法推测地下构造,这就是基于面波频散特性的勘探原理。

基于面波频散特性的勘探根据面波来源和测量方法的不同,包括人工面波法(简称为面波勘探)和台阵地脉动观测法两种。

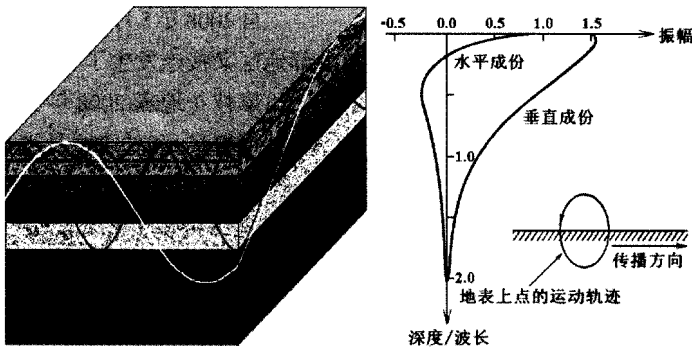


图 1 瑞雷面波穿透深度示意图(右图摘自宇津德治《地震学》P55)
Fig.1 Penetration depth of Rayleigh wave (the right figure is extracted from Seismology written by Yujindezhi)

2.1 高密度面波勘探的方法与特点

面波勘探也称为人工面波法,其特点是通过人工震源在地层中激发弹性波。如图-2所示,把检波器按一定间隔设置在一条直线上形成检波器排列。在检波器排列的延长线上离开一定距离用重锤敲击等方式在地层中激

发地震波,并通过仪器记录检波器接收到的地震波,然后在数据分析时通过频散分析获取记录数据中面波的频散曲线,最后通过频散曲线反演推测地下的剪切波速度构造^[1-3]。

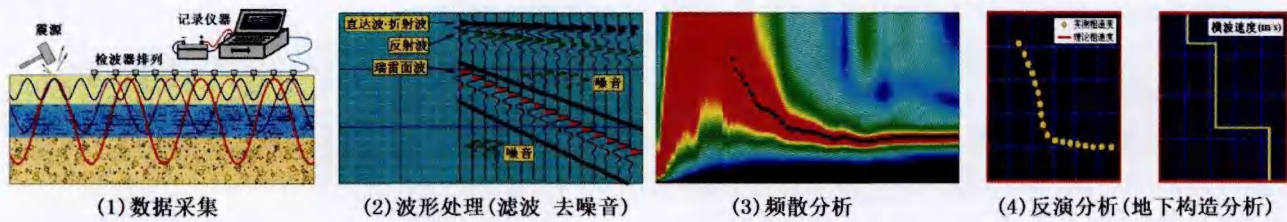


图2 面波勘探之流程
Fig.2 Flow chart of surface wave survey

面波勘探可以沿测线连续进行。如图3所示,首先沿测线布置 M 个检波器,进行数据采集,然后将排列向前移动 K 个检波器,使之与前一排列有 $(M-K)$ 个检波器位置重合,然后进行数据采集,如此重复以上过程直至整天测线采集完。在数据处理时,首先利用重合的检波器的数据作关联对数据进行叠加处理,得到一条能覆盖整条测

线的拟似共震源记录数据,然后再把数据分割成相互重叠的测线段,分别求取各断对应的频散曲线和地下构造模型,经过作图处理,就可以得到沿测线的2维剪切波速度构造。由于该方法沿测线数据密度大,处理结果为连续的2为构造,被称之为高密度面波勘探。

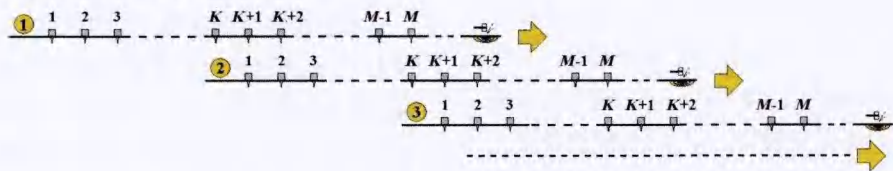


图3 高密度面波勘探之数据采集
Fig.3 Data acquisition of high density surface wave survey

高密度面波勘探所用设备轻便,方法简单,出结果快,精度高,是近年来开发成功的新的物探方法,在土木工程与地质放在方面得到越来越大的重视与应用。

2.2 台阵地脉动观测

即使没有地震,我们所处的地表也在不断的以很小的振幅振动,称为微动或地脉动。大量的观测数据和理论研究证明,地脉动的震源主要来自2个方面,大约1 Hz 以下的长周期地脉动主要由海洋的波浪和气象变化等原因引起,而频率1 Hz 以上的高频地脉动则主要由交通、工厂等人类活动引起。观测数据表明,地脉动存在于地表上的任何地方,其成分中瑞雷面波占优势,因而如果能够从地脉动中提取面波的频散曲线,就能够反演地下构造,这就是台阵地脉动观测的基础。

由台阵地脉动观测数据提取面波频散曲线的常用方法有空间自相关法(Spatial Auto Correlation, 简称SPAC法)和波数-频率功率谱法(简称FK法),其中,SPAC法由Aki^[4]于1957年把地脉动看作是时间上和空间上的稳态随机过程而推导出来的,由于计算量小,相同台阵半径下比FK法的勘探深度大等优点,受到广泛采用。

空间自相关法仅适用于由圆心处的观测点和均匀地分布于圆周上的观测点组成的圆形台阵。对于这样的圆形台阵,空间自相关法可表达为:

$$G(f,r)=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\frac{S(f,r,\theta)}{S_0(f,0)S_0(f,r)}d\theta=J_0(\frac{2\pi fr}{c(f)})\tag{1}$$

式中 $S(f,r,\theta)$ 为圆心处数据与圆周上 θ 方向处的观测数据的交叉谱; $S_0(f,0)$ 和 $S_0(f,r)$ 分别为圆心处和圆周上 θ 方向处数据的功率谱; J_0 为第 I 类 0 阶贝塞尔函数; φ 为波的入射角度; $c(f)$ 为波的相速度; $G(f,r)$ 称为空间自相关系数, r 为圆形台阵半径。

空间自相关法适用于圆形台阵,而台阵地脉动观测通常采用等边三角形台阵。由图4可以看出,由4个点组成的最简单的等边三角形台阵可以分解为以三角形的外界圆半径为台阵半径和以三角形底边长度为半径的两个圆形台阵。之所以可以这样分解,是因为当地下构造横向变化不大时,地脉动在空间具有统计稳定性,换言之,只要两点间的距离和方向不变,其观测数据的交叉谱就不变。

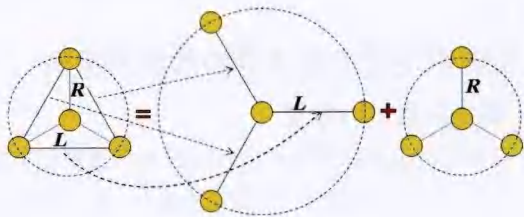


图4 正三角形台阵的分解
Fig.4 Decomposition map of regular triangular array

与高密度面波勘探一样,台阵地脉动观测也可分为数据采集、以去噪音为目的的波形处理、频散分析和反演分析四个步骤组成^[5]。

2.3 小型台阵地脉动观测

在国外,尤其是在日本,台阵地脉动观测在地震防灾领域一直受到高度重视,是城市地区大深度地下勘探的重要手法之一。大深度地下构造调查所用台阵半径一般为数10 m~数1 000 m,测量地脉动的频率范围一般为0.1 Hz~数Hz。在这个频率范围内地脉动信号非常弱,需要使用精密仪器测量,同时,由于台阵半径很大,无法用电缆把各台仪器连接起来,因此需要使用GPS卫星的时间信号使各台仪器之间达到时间同步,所有这些都使得测量仪器非常昂贵,仪器的搬运和设置也非常不方便。

近年来随着研究和技术开发的进展,以浅层地质调查为目的的小形台阵手法受到越来越大的重视。小型台阵的勘探深度一般在100 m以内,所用台阵半径数m~数10 m,测量地脉动的频率范围为2 Hz以上^[6]。这个频率范围的地脉动信号主要由交通设施、工厂的机械设备等人类生产和生活活动引起,信号强,便于测量,所用设备相对廉价简单。特别是本文作者在深入研究台阵地脉动和高密度面波勘探的基础上,提出使用通常的面波勘探设备进行小型台阵地脉动测量,并成功地应用到了上海松江古照壁地下构造调查等工程项目,取得了成功。

利用普通面波勘探设备的小型台阵,直接使用地震大线和固有频率数Hz的地震检波器,仪器坚固轻便,适合野外携带,同时,仪器设置和操作方法简单直观,非常适合西部地区浅层地质调查使用。

小型台阵的形状根据实际地形可灵活设计为图5所示的正三角形、T字形或L形,灵活方便。



图5 各种小型台阵(○表示观测点位置)

Fig.5 A variety of small arrays (○ indicates the location of observation point)

3 在陇南地震灾害调查中的应用实例

3.1 调查测线(点)布置

高密度面波勘探测线和台阵地脉动观测测点布置如表2所示。根据现地踏察,分别在永星村,永光村和马家沟村内的道路上各选取60~70 m一段做高密度面波勘探;分别在永星村、大竜村和马家沟村各选取1~2地点做

台阵地脉动观测。



图6 高密度面波测线和台阵地脉动观测测点分布图

Fig.6 Distribution of high density surface wave lines and array micro-tremor observation points

高密度面波勘探测线位置选取:选择相对较直,起伏较小,且道路两侧受灾严重,具有代表性的路段。本次选取的3条测线都位于山坡上相对平坦的道路上,其中,永星村测线地表呈轻微的V字形,显示地下可能为埋没谷构造;永光村测线选取在地震滑坡滑落崖以上约200米处的田边,附近房屋受灾严重,属于古滑坡地形,测线设置目的是查清古滑坡体的内部结构;马家沟村面波测线地表呈轻微的岭状地形。

台阵地脉动选取地震灾害集中或有对比性场所的空地,其中,永星村台阵位于村内相对位置较低的台地上,周围房屋受灾集中而严重;大竜村台阵位于306省道边的空地上,根据周围地表地形,该调查地点地表应为河床砂砾层或涯积物,为唯一一处非黄土覆盖调查地点,属于地震工程上相对较好的地基,周围受灾轻微;马家沟村台阵观测点位于马家沟村小学的空地上。该小学在地震中受损严重,已经拆除。

台阵地脉动观测采用图7所示正三角形台阵,三角形的每条边上等间距设置5个检波器,共使用12个检波器。

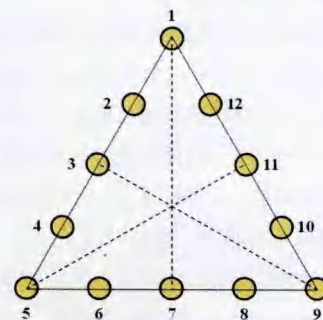


图7 三角形台阵示意图

Fig.7 Diagram of triangular array

表2 高密度面波勘探和台阵地脉动观测一览表
Table 2 High density surface wave survey and array micro-tremor observation

地点	场地描述	勘探手法	工作量
永星村	村中主要道路,两边房屋受灾严重	高密度面波勘探	65 m
	台地,附近房屋倒塌	台阵地脉动观测	1点
大竜村	道路旁空地,附近房屋受灾严重	台阵地脉动观测	1点
永光村	地震滑坡的滑落崖上部田地边,附近房屋倒塌	高密度面波勘探	70 m
马家沟村	村中主要道路,两边房屋受灾严重	高密度面波勘探	70 m
	台地,原为小学校,校舍受灾严重,已经拆除	台阵地脉动	2点

3.2 使用仪器指标及观测参数

本次科考无论是台阵地脉动观测还是高密度面波勘探的数据记录都使用美国 Geometrics 公司生产的 24 通道小型地震勘探数据采集模块(面波仪),该仪器采用 $\Delta-\Sigma$ 24 bit 模数转换,仪器动态范围 144 dB,采样间隔 0.02 ms~16.0 ms 间可调,通频带 1.75~20 000 Hz,单个文件记录长度 65 536 个数据。检波器采用重庆地质仪器厂生产的固有频率 4 Hz,动圈式速度型垂直分量地震检波器。

表3 主要仪器设备技术指标一览表

Table 3 Technical indices of major equipments			
仪器	型号	勘探方法	技术指标
记录仪	Geode-24ch		通道数:24
			A/D 转换: $\Delta-\Sigma$ 型 24 bit
		高密度面波	动态范围:144 dB
		台阵地脉动	通频带:1.75~20 000 Hz
检波器	CDP-Z/P4		固有频率 4 Hz
大线	国产		灵敏度(V/kine):0.28 $\pm$ 5%
激发用重锤	国产	高密度面波	12 道/条,道间距 4 m 木质,约 10 kg

表4 数据采集参数一览表

Table 4 Parameters of data acquisition		
勘探手法	采集参数	
	排列长度/道间距/震源偏移距	24 道/2.0 m/5 m、10 m、15 m
高密度面波	测线长度/排列移动步长	70 m/12 m
	记录长度/采样间隔	2 048/0.001 s
	台阵形状/检波器间距/三角形边长	正三角形/4 m/12~16 m
台阵地脉动	记录时间/文件长度	30~60 分钟/262.144 s
	采样间隔	0.004 s

3.3 高密度面波勘探结果

高密度面波勘探结果如图 8 所示。

从图 8(a)可见,马家沟测线的地下剪切波速度构造可分为 4 层:0~5 m,剪切波速度约 200 m/s 以下,为表层土层;深度 6~16 m,剪切波速度约为 220~240 m/s;深度

17~27 m,剪切波速度为 340~380 m/s。该土层仅存在于测线右半部分,左半部分不存在。剪切波速度 400 m/s 以上的深部地层有可能是黄土下部的砂砾层或基岩。这一界面从左向右呈倾斜状,与地表地形相似。

图 8(b)为永星村面波勘探结果。由结果可见,永星村测线的剪切波速度构造也分为 4 层:深度 0~3 m,剪切波速度约 200 m/s 以下,为表层土层;深度 4~8 m,剪切波速度约为 220~240 m/s;深度 9~30 m,剪切波速度随深度由 260 m/s 逐渐增大到 380 m/s;最下层剪切波速度为 400 m/s 以上。地下构造呈埋没谷状构造。

图 8(c)为永光村面波勘探结果。由图可见,永光村测线表层厚度大,剪切波速度 200 m/s 以下疏松表层的厚度达 8 m,呈水平状;深度 8~20 m 为剪切波速度 220~260 m/s 的土层,该层底部铲状向测线右端倾斜;深度 20 m 以下地层速度逐渐升高至 400 m/s 以上,400 m/s 以上地层的顶面铲状呈向左倾斜。该处测线位于一个古滑坡体上,受滑动影响,表层疏松,内部构造复杂。

各条测线的最下层的剪切波速度都推测为 450 m/s 以上。应该指出的是,勘探深度 40 m 左右已经超出了通常的高密度面波勘探的勘探深度,勘探精度与浅部构造相比大为降低。

3.4 小型台阵地脉动观测结果

小型台阵的勘探结果如图 9~图 11。各图分左右两部分,右图为反演分析推测的地下剪切波速度构造模型,左图为该速度构造模型的理论频散曲线对实测频散曲线的近似程度。由各图可以看出,各模型的理论频散曲线能够很好地拟合实测频散曲线,由此可以判定反演分析过程收敛,分析结果可靠性大。

图 9 为大竜村台阵地脉动观测结果。该测点是本次地震科考中所调查的唯一一处非黄土覆盖场地。如图所示,该场地地表以下 5 m,剪切波速度约 200 m/s,可解释为表层沙土层;深度 5~16 m,剪切波速度约 380 m/s,可以推断为上部砂砾层;深度 16 m 以深,剪切波速度 800 m/s 以上,可推断为基岩层。由勘探结果可以看出,该场地疏松表层薄,基岩深度浅,基岩以上有厚层砂砾层,这些都是大竜村该处受灾较轻的决定性因素。

图 10 为马家沟村台阵地脉动观测结果。如图所示,原马家沟小学的地下构造大致可分为 3 层,从地表到深度 27 m 附近,剪切波速度约为 240 m/s;深度 27~39 m,剪切波速度约为 350 m/s;深度 39 m 以深,剪切波速度约为 800 m/s,可推断为基岩。

图 11 为永星村台阵地脉动观测结果。根据图 11,永

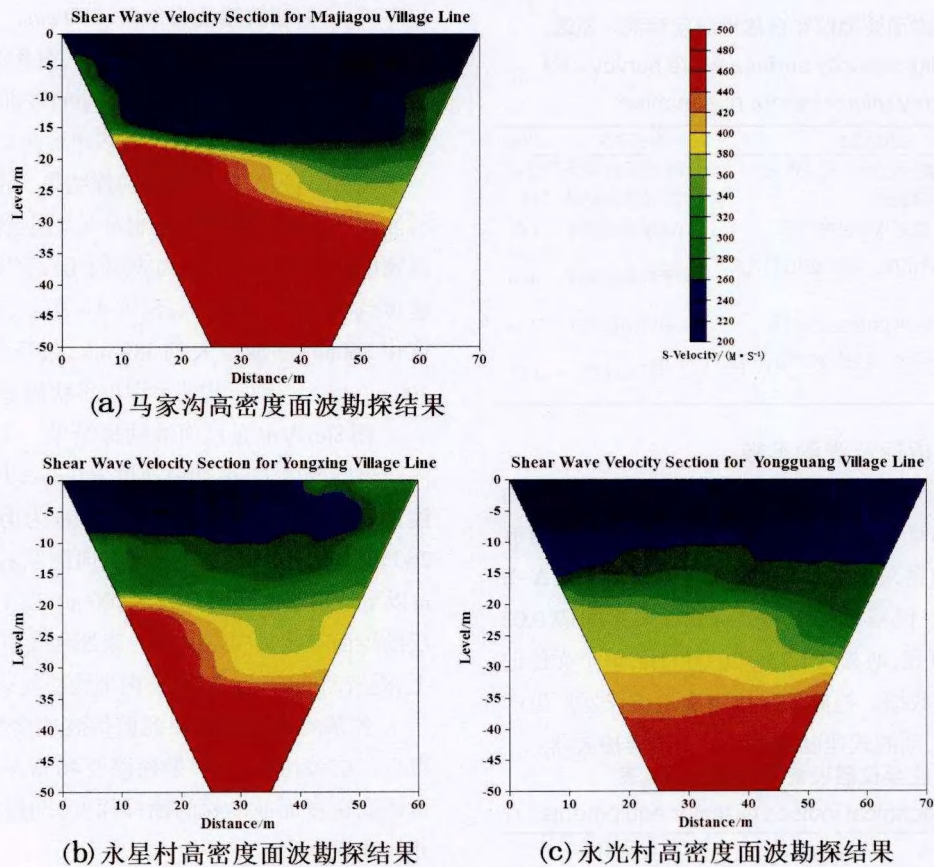


图8 永星村高密度面波勘探结果

Fig.8 Results of high density surface wave survey at Yongxing village

星村台阵观测点地下构造也大致分为3层,从地表到深度27 m附近,剪切波速度约为240 m/s;深度27~46 m,剪切

波速度约为420 m/s;深度46 m以深,剪切波速度约为800 m/s,可推断为基岩。

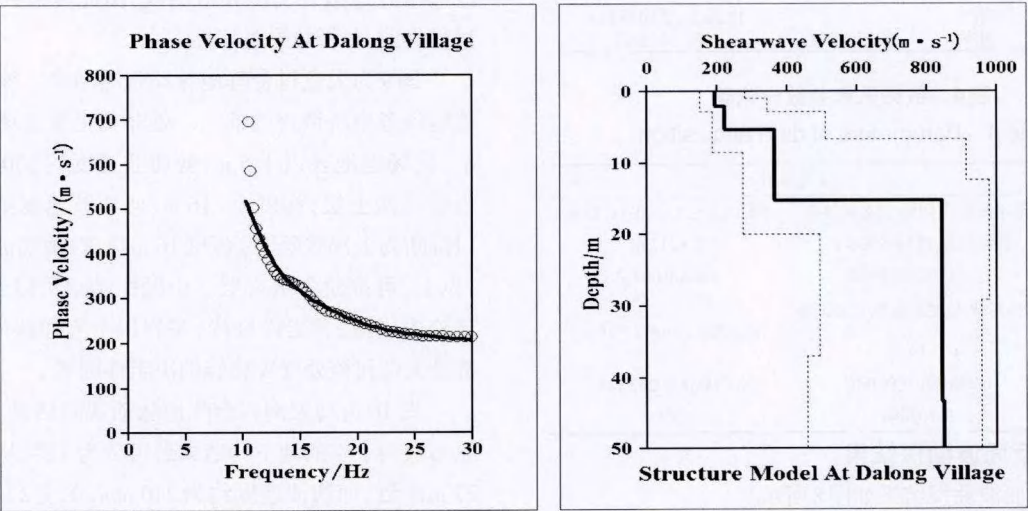


图9 大竜村台阵勘探结果

Fig.9 Results of array survey at Dalong village

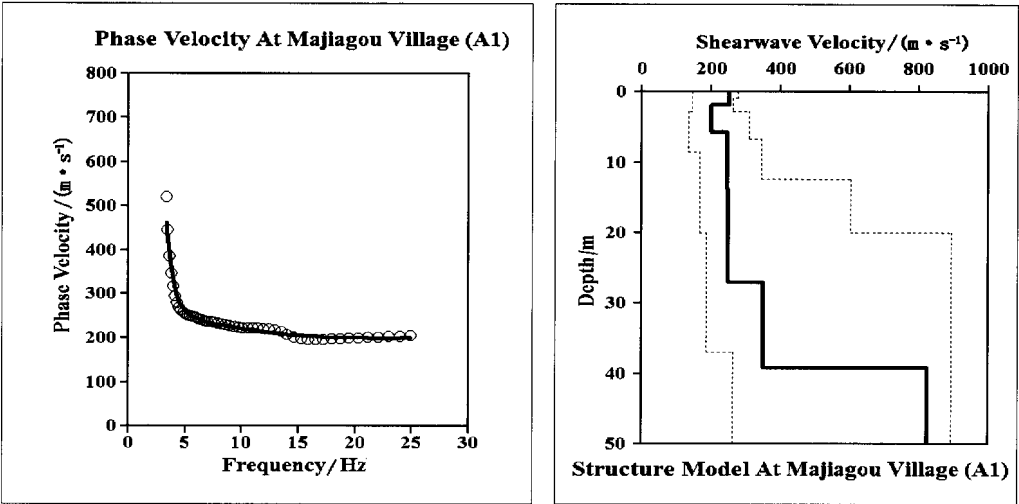


图10 马家沟台阵勘探结果
Fig.10 Results of array survey at Majiagou village

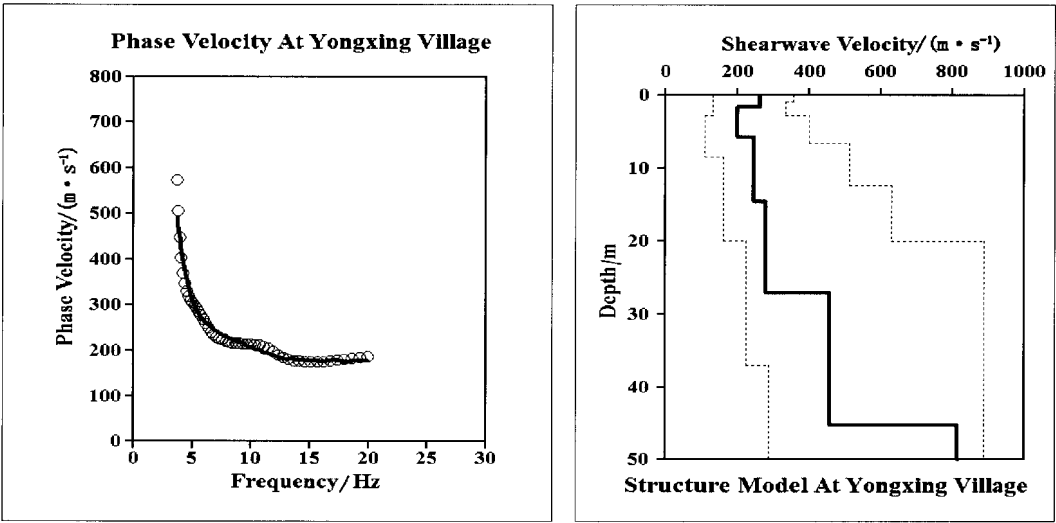


图11 永星村台阵地脉动观测结果
Fig.11 Results of micro-tremor observation at Yongxing village

5 结论

根据西部地区地形地质条件以及地震防灾需求,成功地 把高密度面波勘探和台阵地脉动观测应用到了地震灾害科考中,获取了地震灾区地下构造的基础数据,并得到了以下认识:

(1) 高密度面波勘探可成为西部黄土覆盖区浅层地质调查的有效手段。西部黄土地区地下水位低,黄土剪切波速度高,同时黄土厚度大,内部构造相对简单,为高密度面波勘探提供了有利条件。用人工捶击地面作震源,勘探深度可达30 m以上。

(2) 频率2 Hz以上的高频地脉动即使在机械振动较

少的高山农村依然可以用于地下构造调查。小型台阵所需场地小,对环境要求低,勘探深度可达40 m以上,显示出了极大的有效性。

(3) 小型台阵地脉动观测和高密度面波勘探使用同一套设备,提高了设备的使用效率。所用设备轻便,使用和携带方便,测量方法简单,勘探结果精度高,非常适合我国多山、地质情况复杂而经济上又相对后发展的西部地区地震防灾的需要。

今后计划利用所得到的地下构造模型进行地震响应分析,并与地震灾害分布进行对比研究,使勘探结果与地震防灾紧密地结合起来,为西部地区的地震防灾发挥高密度面波勘探和台阵地脉动观测的作用。

参考文献(References)

- [1] Park CB, Miller RD, Xia J. Multichannel Analysis of Surface Waves[J].Geophysics, 1999, 64(3): 800-808.
- [2] Xia J, Miller R D, Park C B. Estimation of Near-surface Shear-wave Velocity by Inversion of Rayleigh Waves[J].Geophysics, 1999, 64(3): 691-700.
- [3] Yamanaka H, Ishida H. Application of Genetic Algorithms to an Inversion of Surface Wave Dispersion Data[J].Bulletin of the Seismological Society of America, 1996,86(2):436-444.
- [4] Aki K. Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Waves, with Special Reference to Microtremors[J].Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 1957, 35(3):415-456.
- [5] Lacoss RT, Kelly EJ, Toksöz MN. Estimation of Seismic Noise Structure Using Arrays[J].Geophysics, 1969, 34(1): 21-38.
- [6] 冯少孔.微动勘探技术及其在土木工程中的应用[J].岩石力学与工程学报, 2003, 22(6): 1029-1036.
- FENG Shao-kong.Array Microtremor Survey and its Application to Civil Engineering[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(6):1029-1036.(in Chinese)