长周期地脉动观测在西安地区地下构造调查中的应用

刘建军[1]，李跃明[1]，车爱兰[2]

（1.西安交通大学 强度与振动教育部重点实验室，陕西 西安 710049;
2.上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院，上海 200240)

摘 要：通过对西安两个区域（西安交通大学校园、市区东西与南北轴线）进行长周期地脉动观测、数据采集与分析，得到西安地区地下构造固有频率特性，进而推断出观测区地下软土层厚度分布趋势。经过对数据进行Nakamura法处理可以清晰看出：地基土层起着滤波器作用，有选择地滤掉某些成分，放大了某些频谱成分，使谱型局部受到改造；不同场地土质对地脉动的响应具有频率依赖性以及频率选择效应。同时探明观测区长周期地脉动的空间变化规律，了解了沉积层厚度以及横向变化规律，可为西安地区工程抗震提供参考依据。

关键词：西安地区；长周期；地脉动；频谱；固有频率

中图分类号：P315.42 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－0844(2011)增刊－403－05

Application of Long Period Microtremor Observation on Underground Structure Investigation in Xi'an Area

LIU Jian-jun[1], LI Yue-ming[1], CHE Ai-lan[2]

(*1.Ministry of Education Key Laboratory of Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*

2. School of Ships Sea and Architectural Engineering ,Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Through carrying on long period microtremor observation,data acquisition and analysis in two regions (Xi'an Jiaotong University campus, the urban east-west and north-south axis) of Xi'an area, the natural frequency characteristic of underground structure in Xi'an area is obtained, and the distributing tendency of thickness of soft soil is infered. After data treatment using Nakamura method, it is clearly showed that the role of the foundation soil like a filter which selectively filtrats out certain components, amplifies some spectrum components, and causes transformation of the local spectrum shape. In different locations soil texture has the frequency dependence as well as the frequency selection effect when response microtremor. Simultaneously verifying the spatial variation of microtremor, the thickness of sedimentary layers and its lateral variation rule in the surving area are understanded. The result provides the reference for project resistance.

Key words: Xi'an area; Long period；Microtremor；Frequency spectrum；Natural frequency

0 前言

地脉动是具有丰富内涵的地球物理信息，是体波与面波的集合体，由地下震源处产生的地脉动信号经过不同地下构造的多次折射与反射，积累了观测区域场地固有物理信息。

西安市位于渭河断陷盆地中段南部，西安凹陷的东南隅。西安凹陷是渭河断陷盆地中的沉积中心之一，周边被四条深大断裂带所切围，且地下黄土层覆盖较深。有关黄土地区地脉动频谱特征已有学者对其进行过较为深入的分析。石玉成将黄土地区的脉动频谱曲线分为主峰型、主峰山脉型、双峰或多峰型与混合型。不同的黄土地形与地貌对同一震源产生的地脉动波有着不同的过滤和改谱作用，与场地卓越周期与场地土层的刚度、厚度、以及分层情况密切相关。同时地脉动还具有一定的区域性特点，在黄土地区，地下构造的浅层由于结构松散，强度低，处于流塑状态，在发生强烈地震时，上部软土强度急剧下降，甚至呈流动状态。

收稿日期：2011-03-22

基金项目：国家自然科学基金项目（NO:40974070）

作者简介：刘建军（1984-），男，陕西榆林人，硕士研究生，主要研究方向为岩土边坡稳定性.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

长周期地脉动观测[1]是确定场地卓越周期和结构动力特性的重要手段，是获取场地土层宏观动力特征的一种简单快捷方法。通过观测地面或建筑结构的地脉动信号，利用快速傅里叶变换(FFT)将观测到的地脉动信号转换到频域中进行分析，得到场地的卓越周期与固有频率等参数，再由此进行实际工程分析和评估。所以长周期微动观测在黄土地区有良好的应用前景，在工程抗震和防震减灾中具有很大的应用价值[2]。其卓越周期是场地土类型划分、震害预测及建筑场地选址与评价、地震小区划、重要建筑和精密设施场地的工程抗震评价[3]与分析计算的重要依据。

本文对西安地区开展的长周期地脉动观测选择了两个区域：西安交通大学校园（观测区 1），及西安市东西、南北主干道（观测区 2），共布置 24 个观测点。

1 长周期地脉动观测仪与数据处理分析方法

1.1 长周期地脉动观测仪

地脉动测量装置为高灵敏度的地震仪器系统，其中包括检波器和带有放大器、滤波器、记录器以及波形显示器的地震仪（数据采集主机）等。观测时必须排除测点附近人为活动与各种动力源的干扰。本次观测实验使用 SPC-35 与 ES-CORDER 两种观测仪，观测仪主要技术参数如表 1 所示。

SPC-35 地脉动仪包括三个部分：三分量探头（水平 2 方向 NS，EW 及上下 1 方向 UD）；ES-CORDER 地脉动仪包括速度型三份量检波器（LE-3D：水平 2 方向 NS，EW 及上下 1 方向 UD）及数据采集仪 LS-7000SH。

表 1 微动测试仪的主要技术参数

仪器设备	SPC35	ES-CORDER(SL)
生产厂家	东京测振	EISIN SYSTEM
通道数	8	4
分辨率	16 bit	16 bit
取样周期	10, 20, 50, 100, 200, 500, 1 000 Hz	100, 200, 500,1 000 Hz
外形尺寸	460×330×170 mm	430×450×177 mm

1.2 数据处理分析方法

长周期地脉动观测实验数据处理分析方法主要有三种：离散傅里叶快速变换；1/4 波长准则以及剪切波速的确定；Nakamura 方法。

（1） 地脉动的波形是由各种不同频率波组成的，在波形中各种频率波占有量多少的分析就是频谱分析。微动信号频谱分析的基本思想是采用离散傅里叶快速变换(FFT)方法对观测到的地脉动信号进行转换分析。随时间 t 变化量 $X(t)$的离散傅里叶快速变换为

$$X(\omega)=\frac{1}{2\pi}\int_{-T/2}^{T/2}X(t)e^{i\omega}dt \qquad (1)$$

功率谱 $P(w)$用 $X(w)$及其复共轭 $X'(w)$表示为

$$P(\omega)=\frac{1}{T}X(\omega)\cdot X'(\omega) \qquad (2)$$

功率谱用来表示波形中各频率成分之能量大小。

（2） 1/4 波长准则以及剪切波速的确定，假定场地地层不存在软弱夹层时，即为双层构造（表层土层及下部基岩），表层土层的卓越频率 f 可以表示为

$$f=\frac{\varpi}{2\pi}=\frac{1}{2\pi}\frac{\pi V_{ss}}{2H}=\frac{V_{ss}}{4H} \qquad (3)$$

由此可以看出表层的卓越频率 f 为表层土层的剪切波速度 V_{SS} 除以表层厚度 H 的 4 倍，也就是表层厚度 H 中 1/4 波长的剪切变形时的振动数，称为 1/4 波长准则[4]。而对于剪切波波速通常根据钻孔资料利用加权平均波速法确定。

（3）微动数据分析中的 Nakamura 方法[5-6](微动水平分量与竖向分量谱比法)现已成为场地动力特性分析的主要方法，Nakamura 认为，AH/AV 的值与场地条件有关，在越硬的岩石上这个比值越大。以往的研究表明地脉动 FFT 频谱的 $H_{(S)}/V_{(S)}$峰值能反映出场地的固有周期，其中 $H_{(S)}/V_{(S)}$是 FFT 频谱的 EW 和 NS 两个水平分量经过矢量合成与 UD 垂直分量的比值。

$$H/V=\frac{\sqrt{\mathrm{NS}\bullet\mathrm{EW}}}{\mathrm{UD}} \qquad (4)$$

2 观测数据的采集与处理

2.1 观测数据采集与波形分析

在地表进行表层地脉动观测时，尽可能选在平坦、周围无交通振动及工程振动地方。测试仪器采用速度型检波器，将检波器水平置于自由表面，分别测试场地东西向(EW)，南北向(NS)和垂直向(UD)三个方向的地脉动信号。观测时必须严格把握测量环境。观测中选取记录周期为60 min，采样步长0.01 s，总采样点为360 000个。每个测点进行一小时观测时程，西安交通大学校内以及西安市区共布置24个测点，测点波形如图1所示。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

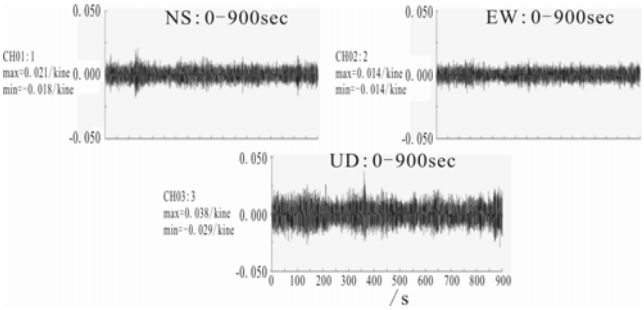


图1　西安地区长周期地脉动波形图示例

Fig.1　Examples of wave form of long period microtremor in Xi'an area.

从图 1 可以看出：（1）地脉动源是平稳的，而且是一种平稳的随机过程。（2）任何特定时间所观测的一组波点呈高斯正态分布，地脉动过程的期望值为零。（3）各观测点地脉动波形 X(t)由无数多个频率分量，并且为强度相等的正弦波叠加而成。从波形上看，本次地脉动观测得到了精度较高的结果。

关于地脉动的振幅特性，从大量观测数据曲线中看出：水平方向的振幅大于垂直方向的振幅，而且场地土层坚硬则振幅小，土层松软则振幅大。即使是同一类土层，不同时间、不同地域、其振幅差异很大，因此，观测期间的环境条件应严格把握。

2.2　观测数据分析

2.2.1　傅里叶快速变换(FFT)结果

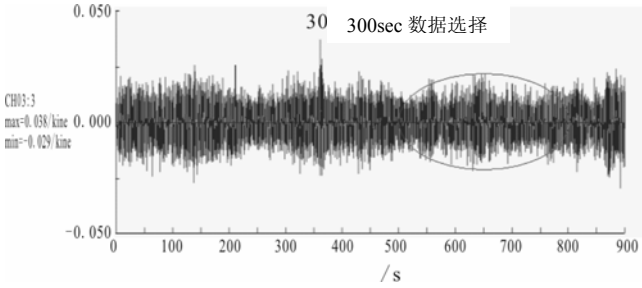


图 2　300 秒数据的选择

Fig.2　The choice of 300 s data.

本次数据处理首先从 24 个观测点处的观测数据中选出较为平稳的数据段，进行 FFT 分析，计算出水平 2 成分（H）与上下 1 成分（V）的傅立叶谱。具体处理方法如下：从 15 分钟的观测数据中选出大约时长为 300sec 的比较安定的时间带，每个时间带为 32768 个数据（如图 2 所示）；同时对观测数据加窗 8 次，如图 3 所示；进行平滑化之后，就可得到各个观测点三个方向的傅里叶谱，如图 4 所示。关于窗函数的选择应兼顾下述三方面：（1）窗长 T 要尽量长；（2）主瓣要高度集中，边瓣尽量小，最好无负边瓣；（3）存贮要小，计算时间短。本次数据分析中采用汉宁窗。

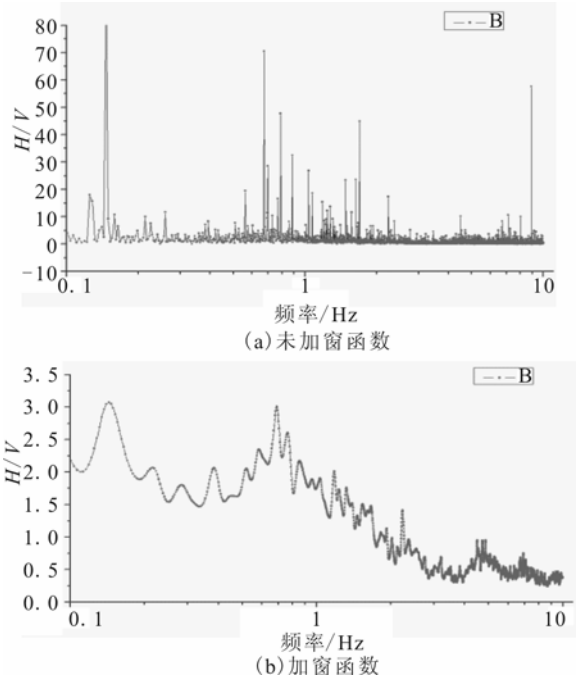


图 3　数据转换的光滑化

Fig.3　Smoothing the data conversion.

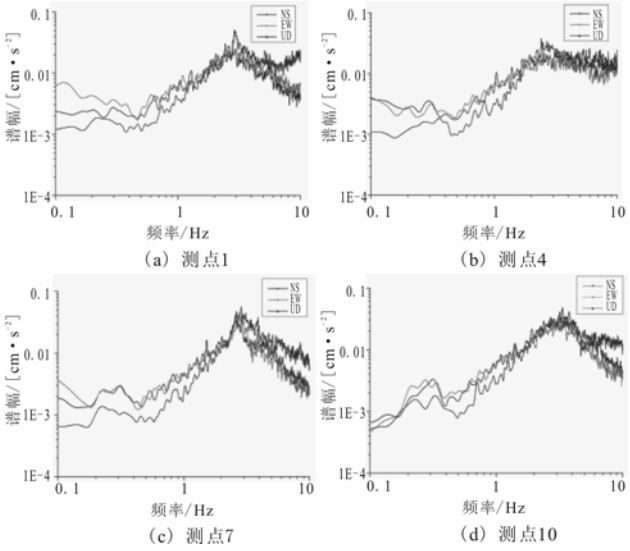


图 4　FFT 频谱示例

Fig.4　Examples of FFT spectrum.

由图 4 可以看出：地脉动的 FFT 频谱特征受整个区域的自然条件所制约。地基土层起着滤波器作用，有选择地滤掉某些成分，有选择地放大了某些频谱成分，使谱型局部受到改造。软土层对高频信

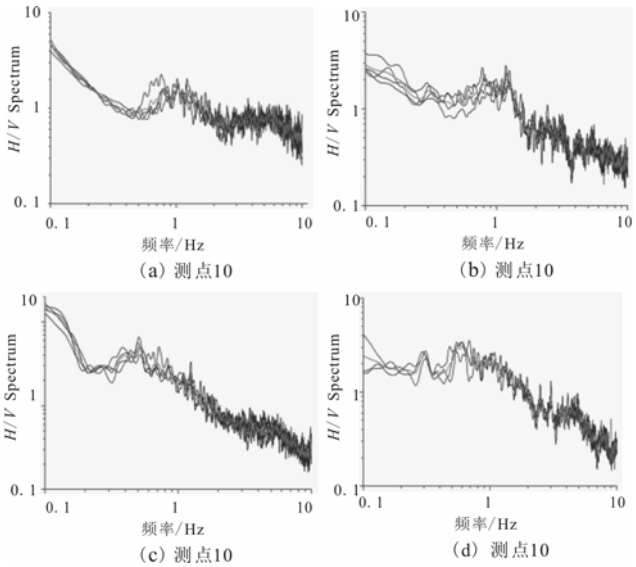
© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

号有滤波作用，对低频信号起放大作用，而硬土层则相反。

经过对 24 个测点进行上述过程处理后得出：西安地区地下构造一阶固有频率在 0.292 Hz 左右，说明此波震源处于地下 150 m 左右的深度，而与此固有频率相对应的 *H/V* 值为 2.917，根据 *AH/AV* 值与场地条件之间关系，推断出该测点处地下构造为基岩；而西安地区地下构造二阶固有频率在 0.359 Hz 左右，*H/V* 值为 2.619，说明该波来自地下浅部层，所处区域为硬土层；西安地区地下构造三阶固有频率为 0.452，*H/V* 值为 2.545，说明此波同样来自浅层，区域的地下物理构造为土层。

2.2.2 *H/V* 频谱分析结果及土层厚度的反演

从每个观测点的 60 分钟的波形记录中选取 4 段相对稳定的记录数据，每段数据长度为 5 分钟，分别对其进行 *H/V* 分析，再求 4 组 *H/V* 的平均值作为每个观测点的 *H/V* 频谱分析结果，如图 5 所示。



（c）测点 7 （d）测点 10

图 5 代表观测点 H/V 频谱

Fig.5 *H/V* spectrums of someobservation points.

读取*H/V*频谱峰值，得到对应观测点的卓越频率以及卓越周期，根据傅光耀《黄土地裂场地桥梁结构地震反应分析》[7]选取表层剪切波波速为161 m/s，通过1/4波长准则反演得到该观测场地的覆盖土层厚度如表2所示

根据表 2 中 *H/V* 频谱结果及反演土层厚度，本文以观测区 1 南北干道，观测区 2 东西与南北主干道为例，作出该观测区地下土层大致分布图，如图 6 所示。为了验证实验结果的正确性，将该结果与参考文献[7]的钻孔资料进行比较。该文对西安地区进行了由西南至东北方向的钻孔勘探，经过对大量勘探资料分析后，推断出西安地区基岩以上的覆盖土层总厚度大约在 150 m 左右[7]。由此可见，本文结果与文献[7]所得结果较接近，说明此次观测实验所得结论是合理的。

表 2 观测点 *H/V* 频谱结果及反演土层厚度

名称	卓越频率/Hz	卓越周期	场地土层厚度/m
XJTUSP1	0.293	3.413	137
XJTUSP2	0.3129	3.195	128
XJTUSP3	0.3143	3.182	130
XJTUSP4	0.2991	3.343	134
XJTUSP5	0.3113	3.212	129
XJTUSP6	0.3021	3.31	133
XJTUSP7	0.3272	3.056	123
XASQSP1	0.3808	2.626	105
XASQSP2	0.31	3.226	130
XASQSP3	0.3583	2.791	112
XASQSP4	0.2991	3.343	134
XASQSP5	0.372	2.688	108
XJTUY1	0.293	3.413	137
XJTUY2	0.3357	2.979	119
XJTUY3	0.3082	3.245	130
XJTUY4	0.3236	3.09	124
XJTUY5	0.2944	3.401	136
XJTUY6	0.3113	3.212	134
XJTUY7	0.2996	3.338	135
XJTUY8	0.3021	3.31	130
XASQY1	0.3547	2.819	113
XASQY2	0.29	3.448	138
XASQY3	0.2825	3.54	142
XASQY4	0.3066	3.262	131

为了更清楚了解地脉动波经不同地域传播以后，波形的幅频相频出现不同变化以及不同地下物理构造对于波的传播有着不同的影响，从五个不同测点的测量数据中选出五组 300 s 时间段，对该五组数据进行水平分量与竖向分量谱值之比，结果如图 7 所示。

由图 7 可以看出：西安地区 *H/V* 频谱第一峰值所对应的震源位于地下 150 m 左右，且地下震源处为坚硬的基岩。由同一震源产生的地脉动波经不同厚度以及特性的岩土层传播后，在地表会产生不同的响应。随着地脉动波继续向地表层传播，五个不同测点处的水平分量与竖向分量谱值之比趋于相同，说明在地表浅层部分地质构造相似。地下构造中的每层土性质和层厚，对地脉动的频率成分有重要的影响，它能增强或削弱入射波群中的个别波，具有滤波，选频特性。尽管地脉动源是随机的，地脉动信号也是随机的，但由于波的多重反射和折射，地脉动在传播过程中积累了反映场地土层固有特性的信息，它是一种不随时间变化的固有信息，使地脉动信号具有某种规律性。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

任何区域的地震频谱、地脉动频谱和地震烈度之间存在一定的内在关系。地脉动卓越周期小，地震烈度小，地震频谱的卓越周期也小；反之，在地脉动卓越周期大的地区，地震烈度和地震频谱的卓越周期也大，它们之间有很强的相关性。在一定的时间空间的尺度范围内，地脉动表现为一个平稳的随机过程，故可利用地脉动频谱在时间域、空间域的各种特性进行观测区地下物理构造的解释。

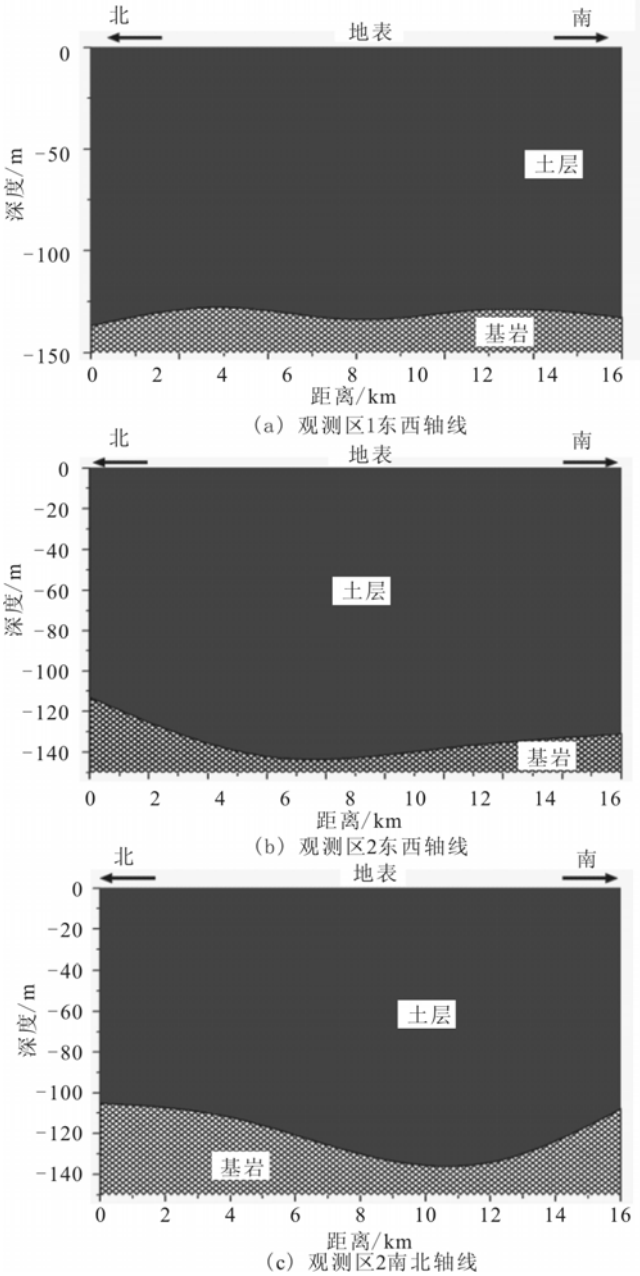


图 6　观测区地下土覆盖层厚度分布图

Fig.6　Thickness of soil covering in the observation area.

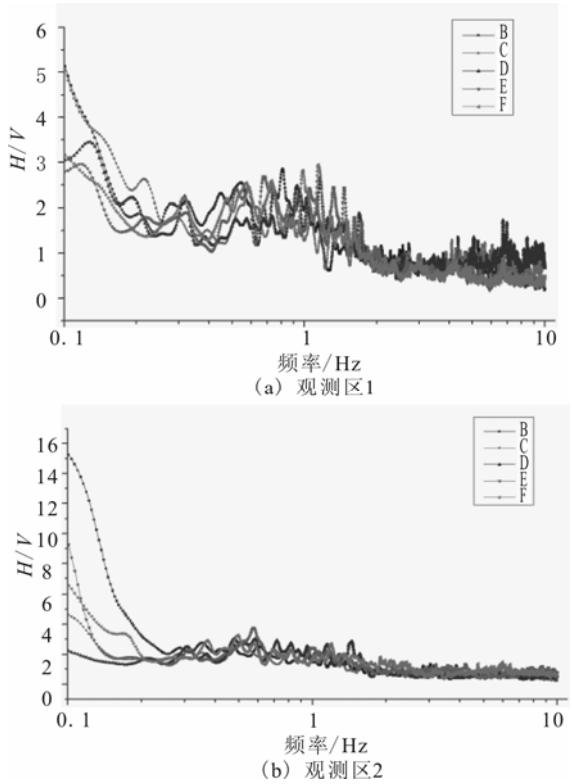


图7　五测点测量结果的对比

Fig.7　Comparison of H/V values from 5 different observation points.

3　结论

本文通过对西安地区进行长周期地脉动观测，对大量观测数据进行分析处理后，得出以下结论：

(1) 在一定的时间空间尺度范围内，地脉动为一种平稳的随机过程；任何特定时间所观测的一组波点呈高斯正态分布，地脉动过程的期望值为零；各观测点地脉动波形$X(t)$由无数多个频率分量，并为强度相等的正弦波叠加而成。

(2) 观测区域的地下构造固有频率在0.3 Hz左右。利用1/4波长准则可以计算出西安地区地下黄土覆盖层的厚度大约在150 m左右。

(3) 地基土层起着滤波器作用，有选择地滤掉某些成分，放大了某些频谱成分，使谱型局部受到改造。软土层对高频信号有滤波作用，对低频信号起放大作用，而硬土层则相反。因而，不同的场地土对地脉动的响应具有频率依赖性以及频率选择效应。

（下转 412 页）

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结论

(1) 在反倾巨厚层状岩体斜坡中不发育缓倾向坡外的结构面时，一般不具备产生重力滑坡的条件。

(2) 地震滑坡的形成中，不仅水平地震力对其起作用，竖向地震力也起着重要作用。对于滑坡，水平和竖向地震力同时作用时影响程度最大。在某些地震滑坡中竖向地震力的作用是至关重要的，甚者其作用胜过水平地震力的作用。

(3) 反倾巨厚层状岩体中发育的地震滑坡，具有相对高差大和坡陡等与其他地震滑坡相同特征；同时此类滑坡具有滑面呈锯齿状、架空，滑带充填岩块，后缘裂隙分布杂乱无章等特征。

[参考文献]

[1] 李树德，任秀生，岳升阳，等. 地震滑坡研究[J]. 水土保持研究，2001，8(2):24-25.

[2] 康来迅，邹谨敞，蒋荣发，等. 昌马断裂带地震滑坡的基本特征[J]. 华南地震，1995，15(1):49-54.

[3] 李秀珍，孔纪名，邓红艳，等. “5·12”汶川地震滑坡特征及失稳破坏模式分析[J]. 四川大学学报，2009，41(3):72-77.

[4] 赵纪生，魏景芝，吴景发，等. 汶川8.0级地震滑坡、崩塌机制[J]. 震灾防御技术，2008，3(4):379-383.

[5] 胡斜闻，罗刚，黄润秋，等. 唐家山滑坡后壁残留山体震后稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报，2009，28(11):2349-2359.

[6] 殷跃平. 汶川八级地震滑坡特征分析[J]. 工程地质学报，2009，17(1):29-38.

[7] 刘应龙，任光明，陈强，等. 反倾层状岩体倾倒变形强烈程度研究[J]. 中国水运，2008，8(12):185-186.

[8] 蔡跃，三谷泰浩，江琦哲郎. 反倾层状岩体边坡稳定性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(12):2517-2522.

[9] 蒋良潍，黄润秋. 反倾层状岩体斜坡弯曲—拉裂两种失稳破坏之判据探讨[J]. 工程地质学报，2006，14(3):289-294.

[10] 谌文武，赵志福，刘高，等. 兰州—海口高速公路甘肃段工程地质问题研究[M]. 兰州：兰州大学出版社，2006.

[11] 张国伟，张本仁，袁学诚，等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京：科学出版社,2001.

[12] 周民都，吕太乙，张元生，等. 青藏高原东北缘地质构造背景及地壳结构研究[J]. 地震学报，2000，22(6):645-653.

[13] 毛彦龙，胡广韬，赵法锁，等. 地震动触发滑坡体滑动的机理[J]. 西安工程学院学报，1998，20(4):45-52.

（上接 407 页）

(4) 通过表层长周期地脉动观测，可以直接把握该地区场地的振动特性，大量研究学者发现：对于同一地区地下物理构造，通过长周期地脉动观测所得的固有频率与发生地震时的震动频率基本一致，只是二者的振幅相差很大，有时高达几千倍[6]。因此通过长周期地脉动观测得到的结果具有十分重要的应用价值。如这一结果可用于如下各个领域：已有建筑物的抗震评价；建筑物的抗震设计；地基分类；地基改良效果检验；滑坡危险程度研究；地热迹象研究等。

[参考文献]

[1] Mura Naka. A method for dynamic character estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Q R of Rtri, 1999, 30 (1): 25-33.

[2] 吴志坚. 常时微动测试在汶川地震甘肃灾区建筑结构震害调查中的应用[J]. 西北地震学报，2009，31（1）:86-90.

[3] 张卫华. 常时微动测试在抗震设计上的应用[J]. 华南地震，2008，27（3）:96-99.

[4] 陶夏新，刘曾武，郭明珠，等. 工程场地条件评定中的地脉动研究[J]. 岩土力学. 2001，21(4)：18-23.

[5] Nakamura Y.A method for dynamic characters estimation of subsurface using microtremors on the ground surface[R]. R of RTRI, 1989, 30:25-33.

[6] Che Ailan，1watate Takahiro，Ge Xiurun. Study on the applicability of frequency spectrum of micro—tremor and dynamic characteristics of sudace ground in Asia area[J]. Journal of Zhejiang University (SCIENCE)，2006，7(11)：1856-1863.

[7] 傅光耀. 黄土地裂场地桥梁结构地震反应分析[D]. 西安：长安大学，2007.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net