

弹性介质面波地脉动单点谱比法研究

Research on spectral ratio of horizontal to vertical component for elastic model and surface microtremors

郭明珠¹, 谢礼立^{2,3}, 凌贤长³

(1. 北京工业大学 工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100022; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 应用概率统计方法, 采用弹性层介质模型, 导出地下体波斜入射成层介质, 在自由表面形成面波地脉动的水平分量与竖向分量谱比表达式。然后, 通过大量模型计算, 论证体波斜入射单层覆盖半空间形成面波地脉动水平分量与竖向分量谱比特性与场地传递函数间的关系。结果表明: 利用地脉动单点谱比法分析面波为主要成分地脉动时, 不能求出场地放大因子; 当覆盖层与下伏基岩的 S 波阻抗比小于 2 时, 也不能得到场地卓越频率; 当阻抗比大于 2 时, 可近似得到场地卓越频率。文中给出了一个场地基阶卓越频率 f_s 与基阶瑞利波峰值卓越频率 f_R 的计算公式: $f_s = 0.8f_R + 0.06$ 。

关键词: 地脉动; 单点谱比法; 场地传递函数

中图分类号: P 315

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2004)04-0450-04

作者简介: 郭明珠(1963-), 男, 博士后, 副教授。主要从事工程地震和强震观测方面的研究。

GUO Ming-zhu¹, XIE Li-li^{2,3}, LING Xian-zhang³

(1. Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit of Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, Harbin 150080, China; 3. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: The rationality for spectral ratio method of horizontal to vertical component (H/V method) for microtremors is discussed with a model of an elastic layer over a half-space. The H/V expressions of surface microtremors for layered media are derived. The feasibility of estimating the horizontal transfer function from H/V of surface microtremors is discussed. It is shown that the spectral ratio method of horizontal to vertical component can be used to estimate the site predominant frequency for surface microtremors when the impedance ratio is larger than 3. The relationship between site frequency and surface microtremors is $f_s = 0.8f_R + 0.06$. However the amplification factor of site is difficult to be decided by H/V method.

Key words: microtremors; spectral ration method; horizontal transfer function

0 引言*

大量的震害调查表明, 场地动力特性对地震灾害有非常重要的影响。测试场地动力特性最理想的方法是通过分析强震记录获得场地卓越频率和放大因子, 但是这种方法要等到地震发生后才能实现。而场地动力特性测试的地脉动法, 则是一种简单方便经济的测试方法。1989 年日本学者 Nakamura 提出利用地脉动记录的水平分量与竖向分量谱比进行场地动力特性测试(下文称单点谱比法), 更引起了国际地震工程界的广泛关注。实际资料分析表明, 单点谱比法在场地动力特性测试中与强震动记录的分析结果相比得到了比其它地脉动方法更准确的场地基本卓越频率和偏小的场地放大因子^[1~4]。但由于这种方法缺乏足够的理论依据, 由此得到的结果能不能代表场地传递函数, 甚至其基本卓越频率能不能反映真实场地的基本卓越频率仍有争论^[5]。甚至有学者认为水平运动属于剪切运动, 竖向运动属压缩运动, 二者不能混为一谈^[6]。十几

年来, 很多地震工程工作者对这一方法进行了探讨。Lachet 和 Bard 基于地脉动主要由瑞利波组成的假设^[7], 采用数值模拟方法, 利用成层介质模型研究了表面源激发的瑞利波水平分量与竖向分量谱比与垂直入射 S 波确定的场地传递函数间的关系。他们同时采用平面波研究 SV 波以单一入射角入射至成层场地时, 场地表面水平分量与竖向分量谱比随入射角的变化特性。他们认为地脉动单点谱比法可以得到场地基本卓越频率, 但采用单点谱比法确定场地放大因子的依据不充分。近几年来, 国内外进行了大量的地脉动测试, 以验证地脉动单点谱比法与强震分析结果的一致性。Bard 和郭明珠对这些研究进行了系统的总结^[3,8]。由地震波基本理论可知, 地脉动可能由表面源或地下传来的振动形成, 且地脉动的成分可能为体波, 也可能为面波, 或二者的混合。Lachet 和 Bard 研究了表面源激发的地脉动水平分量与竖向分量谱比特性, 本文则研

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50278096)

收稿日期: 2003-07-24

究从地下介质传来的振动形成的地脉动水平分量与竖向分量谱比特性。本文依据地脉动的形成机制, 将地脉动分为体波地脉动和面波地脉动, 以论证地脉动单点谱比法的有效性。文献[9]分析了体波地脉动测试场地动力特性的有效性, 本文采用成层介质模型, 讨论地下体波斜入射成层介质, 在自由表面形成面波地脉动的水平分量与竖向分量谱比特性。并就最简单的情况, 即单层覆盖弹性半空间, 论证面波为主要成分地脉动测定场地动力特性的有效性。

1 地脉动单点谱比法表达式

图 1 是平行的 n 层介质, 第 n 层厚度为 d_n , 第 N 层为弹性半空间($d_n \rightarrow \infty$)。当平面谐波 P 波和 SV 波斜入射在 $N-1$ 个内界面上, 则波部分在半空间反射, 部分折射入层状介质中。根据文献[10], 对于单一入射角振幅为 A_N'' 的 P 波入射时, 地表位移或速度水平分量与竖向分量谱比表达式为

$$\frac{\dot{u}_{0pi}}{w_{0pi}} = \frac{u_{0pi}}{w_{0pi}} = \frac{J_{42} - J_{32}}{J_{31} - J_{41}}, \tag{1}$$

对于单一入射角振幅为 B_N'' 的 SV 波入射时, 地表位移或速度水平分量与竖向分量谱比表达式为

$$\frac{\dot{u}_{0si}}{w_{0si}} = \frac{u_{0si}}{w_{0si}} = \frac{J_{22} - J_{12}}{J_{11} - J_{21}}. \tag{2}$$

式中 $\dot{u}_{0pi}, \dot{w}_{0pi}, u_{0pi}, w_{0pi}, \dot{u}_{0si}, \dot{w}_{0si}, u_{0si}$ 和 w_{0si} 分别表示地表地震动速度和位移的水平 and 竖向分量。式(2)对于体波仅表示水平分量与竖向分量谱比, 而对于面波这个表达式既是水平分量与竖向分量谱比, 也是面波频散曲线表达式。研究面波和体波时的差别在于面波存在频散, 体波无频散发生。行列式 J 的元素见文献[10], 它们是含有层厚度, 剪切波速, 压缩波速和层密度的行列式。式(1)是研究单一入射角地震动时的谱比表达式。将不同入射角($0^\circ \sim 90^\circ$)的 P 波和 SV 波的水平分量与竖向分量分别叠加即得层状介质表面面波地脉动谱比表达式:

$$\frac{u_0}{w_0} = \iint_0^{90} \frac{J_{22} - J_{12} + J_{42} - J_{32}}{J_{11} - J_{21} + J_{31} - J_{41}} di_p di_{sv}. \tag{3}$$

上式即为体波斜入射成层介质形成地表地脉动水平分量与竖向分量谱比表达式。通过瑞利波的频散方程可求得瑞利波的频散曲线。把不同频率及对应的速度代入

矩阵 J 的元素中, 可通过式(2)求得成层介质场地自由表面瑞利波水平分量与竖向分量位移或速度谱比。

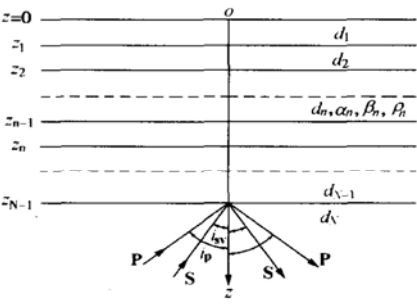


图 1 层状介质模型
Fig. 1 Model of layered medium

2 面波地脉动单点谱比法测定单层覆盖半空间场地传递函数的有效性

本文选择了不同厚度, 不同 S 波阻抗比(层状介质中下层与上层 S 波速度和密度的乘积之比)的速度构造模型, 分析 P-SV 波斜入射单层覆盖半空间时, 自由表面地脉动水平分量与竖向分量谱比、体波斜入射水平向传递函数, 随场地厚度及 S 波阻抗比的变化特性。

单层覆盖半空间场地参数的确定遵循如下原则: 半空间中的横波速度 $\beta=500$ m/s, 泊松比 $\nu=0.25$, 密度 $\rho=2.2 \times 10^3$ kg/m³; 场地覆盖层内介质密度 $\rho=1.9 \times 10^3$ kg/m³, 泊松比 $\nu=0.3$, 厚度 $d_1=20$ m, S 波速度由给定的阻抗比确定; 半空间和场地覆盖层内介质的 P 波速度均由泊松比确定。下面给出本文使用的部分场地构造模型(模型参数见表 1)。依据表 1 的模型, 分析单层覆盖半空间不同 S 波阻抗比和层厚时, 垂直入射 S 波水平向传递函数和瑞利波水平分量与竖向分量谱比特性的关系。分别讨论了厚度为 10, 20, 40, 60, 80 m, S 波阻抗比为 1.8, 2, 2.1, 2.2, 2.4, 2.5, 3, 6 时, 垂直入射 S 波水平向传递函数和瑞利波水平分量与竖向分量谱比曲线。图 2 和图 3 分别给出厚度为 20, 60 m 时, 阻抗比为 1.8 和 6 时, 垂直入射 S 波水平向传递函数和瑞利波水平分量与竖向分量谱比曲线。图中括号内数值分别为各谱比曲线对应的基阶卓越频率和相应的谱比极大值。分析表明: 当场地的 S 波阻抗比小于等于 2 时, 瑞利波振动水平分量与竖向分量谱比和垂直入射 S 波水平向传递函数曲线差别较大, 即很难用

表 1 本文使用的部分模型的参数
Table 1 The parameters of layered medium

层参数	模型 1(S 波阻抗比为 2)			模型 2(S 波阻抗比为 3)			模型 3(S 波阻抗比为 6)		
	纵波速 /(m·s ⁻¹)	横波速 /(m·s ⁻¹)	厚度 /m	纵波速 /(m·s ⁻¹)	横波速 /(m·s ⁻¹)	厚度 /m	纵波速 /(m·s ⁻¹)	横波速 /(m·s ⁻¹)	厚度 /m
覆盖层	540	289	20, 60	361	193	20, 60	180	90	20, 60
半空间	866	500	∞	866	500	∞	866	500	∞

地表瑞利波振动的水平分量与竖向分量谱比计算场地的卓越频率;当场地的 S 波阻抗比为 2.1 时,瑞利波振动水平分量与竖向分量谱比极值对应的频率与垂直入射 S 波水平向传递函数曲线求得的基阶卓越频率较接近。根据以上分析基本可以认为当 S 波阻抗比小于等于 2 时,瑞利波水平分量与竖向分量谱比和垂直入射 S 波水平向传递函数间很难建立起对应关系。当 S 波阻抗比大于 2.1 时,瑞利波振动的水平分量与竖向分量谱比和垂直入射 S 波水平向传递函数在确定场地卓越频率时可能存在某种对应关系。为此本文将着手建立阻抗比大于 3 时,不同厚度单层覆盖半空间场地瑞利波振动水平分量与竖向分量谱比确定的场地基阶卓越频率 f_R 和垂直入射 S 波水平向传递函数求得的场地基阶卓越频率 f_s 间的简单关系。采用回归分析的方法得到二者关系为 $f_s = 0.8f_R + 0.06$ 。图 4 给出不同阻抗比和厚度时场地卓越频率与地脉动卓越频率间的关系曲线。图 5 是地脉动卓越频率与场地传递函数频率间的回归关系, f_R 表示地脉动谱比得到的频率曲线, f_s 表示通过场地传递函数的场地卓越频率。由于两种传递函数法的幅值随场地 S 波的阻抗比变化较大(图 2 和图 3),所以,很难建立场地瑞利波振动水平分量与竖向分量谱比幅值与垂直入射 S 波水平向传递函数幅值之间的关系,本文对此未做深入讨论。

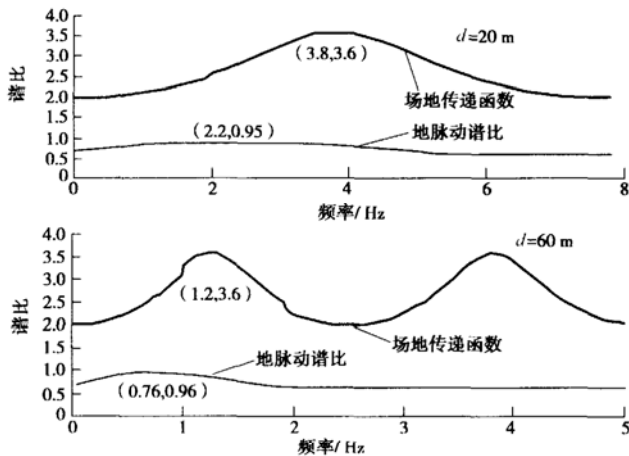


图 2 S 波阻抗比为 1.8 时,不同厚度时的谱比与场地传递函数曲线

Fig. 2 The spectrum ratio and transfer function curves with S wave impedance ratio of 1.8 for different thickness of soil layer

3 结 论

(1) 导出体波斜入射成层介质形成面波地脉动的水平分量与竖向分量谱比表达式。

(2) 论证了在简单覆盖场地,当上下介质的阻抗比大于 3 时,面波地脉动单点谱比法可以近似得到场地

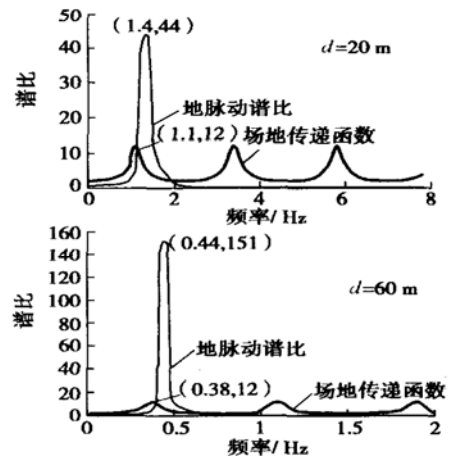


图 3 S 波阻抗比为 6 时,不同厚度时的谱比与场地传递函数曲线

Fig. 3 The spectrum ratio and transfer function curves with S wave impedance ratio of 6 for different thickness of soil layer

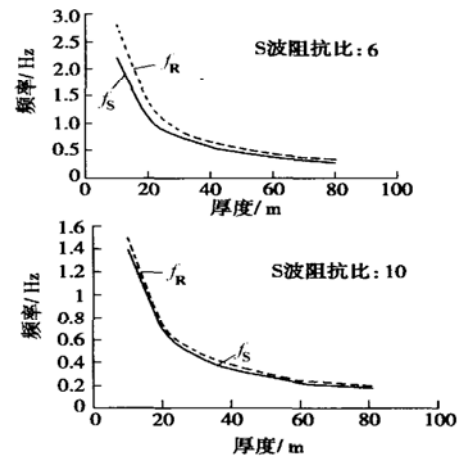


图 4 不同阻抗比和厚度时场地卓越频率与地脉动卓越频率间的关系曲线(f_R 表示地脉动谱比得到的频率曲线, f_s 表示场地卓越频率)

Fig. 4 The frequency curves with different spectrum ratio and thickness of soil layer

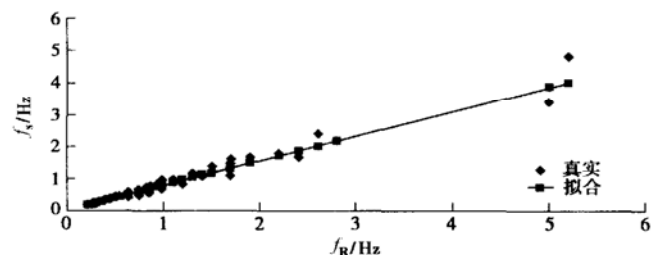


图 5 地脉动卓越频率与场地传递函数频率间的回归关系

Fig. 5 The regressive curves between the frequency of microtremors and transfer function

卓越频率。当阻抗比小于 3 时,不能从它们的水平分量与竖向分量谱比中求得场地卓越频率。

(3) 对于简单覆盖场地,当上下介质的阻抗比大于

3时,面波地脉动单点谱比法确定的场地基阶卓越频率和场地卓越频率间的简单关系为 $f_s = 0.8f_R + 0.06$ 。

(4)地脉动面波单点谱比法很难得到场地的放大因子。

参考文献:

- [1] Lermo J, Chavez-Garcia J. Are microtremors useful in site response evaluation? [J]. Bull Seism Soc Am, 1994, **84**: 1350–1364.
- [2] Field E, Jacob K. A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent [J]. Bull Seism Soc Am, 1995, **85**: 1127–1143.
- [3] Bard P. Microtremors measurements: a tool for site effect estimation [R]. ESG 98 symposium, 1998.
- [4] Triantafyllidis P, et al. Site effect in the city of Thessaloniki (Greece) estimated from acceleration data and 1D local soil profiles [J]. Bull Seim Soc Am, 1999, **89**: 521–537.
- [5] Kudo K. Practical estimates of site response (state-of-the-art report) [A]. Proc of the Fifth International conf Seism Zonation [C]. 1995. 1878–1906.
- [6] Nakamura. Clear identification of fundamental idea of Nakamura technique and its applications [C]. 2000. 12WCEE. 2656#.
- [7] Lachet C, Bard P, et al. Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches [J]. Bull Seism Soc Am, 1994, **86**: 228–241.
- [8] 郭明珠. 地脉动波场分析及其在场地动力特性测试中的应用 (博士学位论文) [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学所, 2000.
- [9] 郭明珠, 谢礼立, 等. 体波地脉动单点谱比法研究 [J]. 岩土力学 [J], 2003, **24**(1): 109–112.
- [10] 傅淑芳, 刘宝诚. 地震学教程 [M]. 北京: 地震出版社, 1991.

简讯

第七届全国工程地质学术大会通知(第2号)

由中国地质学会工程地质专业委员会主办的第七届全国工程地质学术大会将于2004年10月21~24日在中国昆明召开。会议由中国水电昆明勘测设计研究院承办,由中科院地质与地球物理所工程地质力学重点实验室、北京中科务实地质工程技术有限责任公司、云南勘察岩土协会、中国有色金属昆明勘察设计研究院、云南地质工程勘察设计院、云南省公路规划勘察设计院和西南有色昆明勘察设计(院)股份公司共同协办。

会议的主题是工程地质学科现状、挑战、创新。议题包括:各类工程建设中的工程地质问题;地质灾害(天然和人为的)的预测预报和防治;工程地质新技术

和新方法;工程地质学科基本理论的创新;工程地质学科地位与工程地质教育。

会议地址为昆明市白塔路206号,昆明市明都大酒店,邮编650051,电话0871-6240666。大会会议时间为2004年10月21~24日,20日报到。专业委员会新老委员换届会议时间为2004年10月19~20日,18日报到。组织委员会秘书长许兵联系方式:010-62008437(O), 13671108477, engineer2003@263.net.cn;副秘书长宋玉环联系方式:010-62008068(O), 13661349288, gcdz@mail.igcas.ac.cn;昆明联系人朱丽芬(昆明水电院)联系方式:0871-3162093-2623, -2738。

(中国地质学会工程地质专业委员会 供稿)