

基于谱比法的我国强震台站场地分类

温瑞智, 冀 昆, 任叶飞, 王宏伟

(中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 目前我国强震台网的部分台站场地资料尚不完整, 很大程度限制了我国强震数据的广泛应用。为改变这一现状, 利用日本 KiK-net 台站的场地钻孔资料和强震记录, 按照规范对其中 279 个台站进行场地分类, 利用谱比法统计我国 I, II, III 三类场地的标准谱比曲线, 并通过分析谱比曲线卓越周期、谱比峰值和谱形差异, 提出适合我国抗震规范场地类别划分的经验方法。利用四川地区的强震台站钻孔资料进行方法验证, 说明地域性差异对本场地分类方法准确率的影响不大。最后, 处理了中国大陆 2007~2011 年的强震记录, 按照该方法对 113 个强震台站进行场地分类。

关键词: 地震学; 场地分类; 谱比法; 强震记录

中图分类号: P 315.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2015)06-1236-06

SITE CLASSIFICATION FOR STRONG EARTHQUAKE STATIONS IN CHINA USING SPECTRAL RATIO METHOD

WEN Ruizhi, JI Kun, REN Yefei, WANG Hongwei

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

Abstract: Site conditions of some strong earthquake stations in China are still unknown, which greatly restrict the effective application of strong earthquake records. A site classification scheme was proposed based on the strong earthquake data from Japanese KiK-net stations according to standard, and the mean site classification curves in China were calculated using the spectral ratio method from 279 stations of KiK-net. Then an empirical method for the site classification in China was proposed based on the range of predominant period, the peak value of spectral ratio and the spectral shape. Compared with the borehole information of stations in Sichuan province, China, the classified result shows that this method is independent of differences of regions. Finally, 113 strong earthquake stations of China were classified using the records during 2007 to 2011.

Key words: seismology; site classification; spectral ratio method; strong earthquake records

1 引言

中国数字强震台网由千余个自由地表强震台站组成, 部分台站所处地区偏远, 通过钻孔勘测确定其场地分类比较困难。强震台站场地条件是强震记

录正确使用的前提, 在地震动衰减关系研究、结构抗震设计等许多工作中均需要这一基础信息。但目前我国公布的强震记录中对台站场地条件均采取简化方法描述, 即仅分为基岩或土层 2 类, 并无法满足相关工作的需要。例如, 我国抗震规范^[1]中的时程分析法明确要求按照场地类别选取实际强震记

收稿日期: 2014-06-09; **修回日期:** 2014-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308515); 公益性行业科研资助项目(201208014)

作者简介: 温瑞智(1968-), 男, 1999 年于中国地震局工程力学研究所防灾减灾工程与防护工程专业获博士学位, 现任研究员、博士生导师, 主要从事工程地震与强震观测技术方面的教学与研究工作。E-mail: ruizhi@iem.ac.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0760

录,工程场地安全评价^[2]中也规定如本地有强震记录时,宜充分利用其合成适合工程场地的基岩地震动时程。虽然我国数字强震台网自 2008 年全面运行以来获得了大量宝贵的强震记录,但其对应的场地类别缺失却很大程度制约了强震数据的使用。因此开展强震台站场地分类工作在科学研究及工程应用中均具有重要意义。

随着强震观测技术的迅速发展,强震记录不断增加,不少研究人员尝试直接利用强震记录对台站进行场地分类。本文所用的单台水平/竖向(H/V)谱比法是最早由 Y. Nakamura^[3]提出的基于同一地表测点的地脉动水平分量与竖向分量傅里叶幅值谱比来估计场地特征的方法;F. Yamazaki 和 M. A. Ansary^[4]将该方法扩展到利用强震记录进行场地分类上;为避免人工截取剪切波以及采用不同窗函数平滑傅里叶谱引入的人为误差,J. X. Zhao 等^[5]用阻尼比为 5%的水平与竖向速度反应谱比替代傅里叶幅值谱谱比,并以日本抗震规范为分类标准给出了强震台站场地划分的 H/V 谱比法;C. D. Alessandro 等^[6-7]在该方法的基础上分别对意大利和伊朗的强震台站进行了场地分类。我国 R. Z. Wen 等^[8-9]也开展了类似工作,但仅对四川地区的局部台站实现了分类,受我国强震记录数量限制,并没有统计我国抗震规范中不同场地类别的标准谱比曲线。

在已有学者研究成果的基础上,本文尝试利用日本强震台网 KiK-net 台站中的强震数据及钻孔资料统计出我国抗震规范中不同场地类别的标准谱比曲线,提出一种可以用于我国强震台站的场地谱比分类方法。

2 中国规范场地分类标准谱比曲线

H/V 谱比法场地分类的基础是统计出不同场地类别的平均 H/V 谱比曲线作为标准曲线,然后再将待分类台站的 H/V 谱比曲线与标准曲线进行匹配。我国的强震数据自 2007 年以来虽然数量不断增加,但总量仍然偏少,不足以按照抗震规范中的场地分类统计出标准曲线。KiK-net 台站不仅具有详细钻孔资料,且钻孔深度足以满足我国抗震规范中的最大覆盖土层厚度 20 m。同时其强震记录数量十分可观,提供了足够的作为参考样本,保证了统计曲线稳定可靠。本文谱比法场地分类的思路如下:

(1) 分析 KiK-net 台站的强震数据以及钻孔资料,按我国抗震规范进行场地分类。

(2) 利用 KiK-net 台站强震记录,统计出我国抗震规范不同场地类别的 H/V 标准谱比曲线及标准差。

(3) 基于我国强震台网获得的强震观测数据,计算每个强震台站的 H/V 谱比曲线,与不同场地类别的标准曲线进行匹配,实现中国强震台站场地分类。

2.1 场地分类标准

本文收集了 KiK-net 台站钻孔资料以及 1996~2012 年共计 609 个台站的自由地表 151 731 组(3 分量)地震动加速度记录作为原始数据。依据钻孔资料按照我国抗震规范对上述台站进行分类后,Ⅰ₀类场地台站 7 个,Ⅰ₁类场地台站 87 个,Ⅱ类场地台站 482 个,Ⅲ类场地台站 29 个,Ⅳ类台站场地 4 个。Ⅱ类场地所占比例接近 80%,这与我国抗震规范中Ⅱ类场地的取值覆盖范围远远大于其余场地类别有关。

我国抗震规范中边界线处的等效剪切波速和覆盖层厚度可能导致分类结果跳跃的现象,如出现等效剪切波速相差 1 m/s,或覆盖土层厚度相差 1 m,导致结果相差一级的现象。参考同类问题的处理方法^[10],将等效剪切波速 V_{s20} (m/s)和覆盖土层厚度 H (m)的规范取值上界下调 15%,下界上调 15%,避免了分类边界的搭接问题,表 1 为本文所取的场地类别划分标准。图 1 将原规范中取值区间和本文取值区间进行了对比,其中,阴影区域为本文所取的考虑边界不确定性的分类区间。可以看出调整后,基本避免了Ⅰ(含Ⅰ₀,Ⅰ₁类),Ⅱ,Ⅲ类场地的相互搭接。统计得到的平均 H/V 曲线能更好地体现 3 类场地的基本特征,且可以有效降低谱比曲线不同周期点的离散程度。KiK-net 强震台站中Ⅳ类场地台站数量仅为 4 个,无法建立可靠的 H/V 谱比曲线,同时由于Ⅳ类场地属于软弱场地,根据我国强震台站选址要求及工程实践,台站位于Ⅳ类场地的可能性很小且容易直观判断,因此本文并未考虑该类场地。

表 1 场地类别划分标准

Table 1 The criterion of site classification

20 m 等效剪切波速 $V_{s20}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	土层覆盖层厚度 H/m				
	Ⅰ ₀ 类	Ⅰ ₁ 类	Ⅱ类	Ⅲ类	Ⅳ类
> 800	0				
(575, 755]		0			
(288, 463]		< 5	6		
(165, 235]		< 3	5~43	> 50	
130		< 3	5~13	15~80	> 80

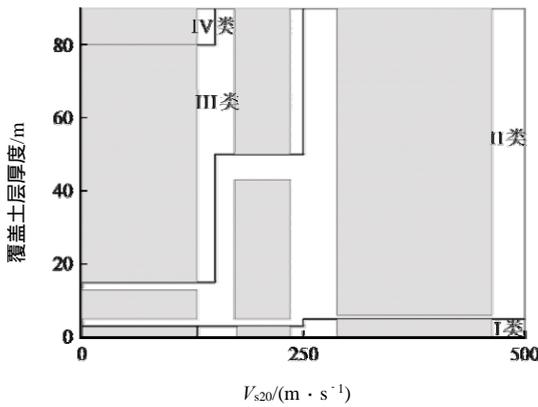


图1 考虑边界不确定性的场地划分

Fig.1 Site classification considering the boundary uncertainty

2.2 强震记录处理与筛选

为使台站的 H/V 平均谱比曲线具有代表性,选取获得记录超过 3 条以上的强震台站来计算平均谱比曲线。实际上,由于日本地震频繁, KiK-net 台站布设密集,记录筛选时间跨度大,单个台站的记录数均远大于 3,本文选用样本中记录最少的台站也捕获了 13 组记录。大部分台站捕获的记录数量为几百到几千组不等,大样本平均得到的 H/V 谱比曲线足以反映台站的场地特性,统计得到的标准曲线更加稳定可靠。

一般认为基线漂移对地震动峰值加速度(peak ground acceleration, PGA)几乎无影响,同时对于周期小于 20 s 的反应谱的影响可以忽略^[11],因此未对记录做进一步基线校正,并采用 Butterworth 非因果滤波移除强震记录噪声,截止频率为 0.25 ~ 25.00 Hz,保证本文研究的周期段在 0.05 ~ 3.00 s 有效。

强震下土层剪切模量会出现退化,与弱震结果相比,谱比曲线的卓越周期向长周期移动;同时由于阻尼比的增大,导致强震下的场地反应比弱震有所缩小^[12]。通常认为地表加速度记录峰值在 100 cm/s^2 以上时,土层会产生上述非线性反应,进而引起 H/V 谱比卓越周期和幅值的变化,为了排除非线性反应对结果的干扰,仅选取 PGA 为 5 ~ 100 cm/s^2 的记录作为统计样本。

经过对强震记录的处理和筛选,并剔除部分处于分类边界处的台站,最终确定了 KiK-net 中 279 个台站,36 018 组强震记录(1996 ~ 2012 年)作为统计样本,台站分类结果如表 2 所示。

2.3 标准谱比曲线

分别求出节 2.2 中筛选后的 279 个 KiK-net 台站的 H/V 平均谱比曲线,进而得到不同类别场地的平均谱比曲线。计算式为

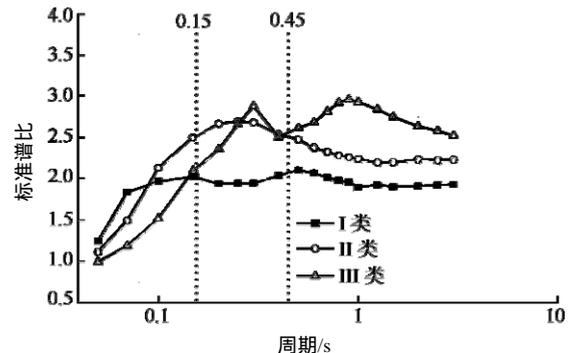
表 2 KiK-net 台站分类结果

Table 2 Site classification for KiK-net station

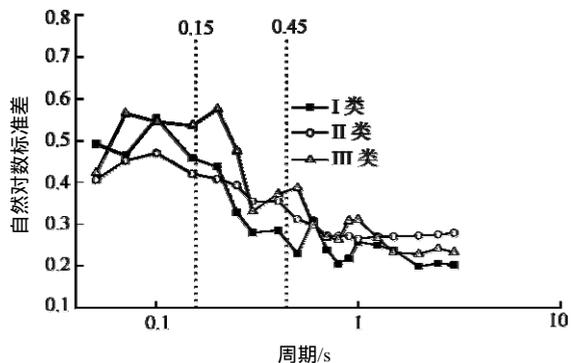
场地分类	台站数量/个	记录数量/组	台站比例/%	记录比例/%
I 类	30	3 341	11	9
II 类	223	29 913	79	83
III 类	26	2 764	10	8

$$H/V = \frac{\sqrt{EW \times NS}}{UD} \quad (1)$$

式中: EW , NS , UD 分别为东西、南北、竖直方向记录的 5% 阻尼比速度反应谱值; H/V 即水平/竖向谱比。图 2(a)为统计得到的我国抗震规范^[1]I, II, III 类场地的 H/V 平均谱比曲线,作为标准曲线为下文分类提供依据。从图 2(a)可以看出, I 类场地较 II 和 III 类场地而言,曲线更为平坦,在 0.1 s 后出现波峰,幅值为 2.0 左右,小于其余场地。主要由于 I 类场地较为坚硬,地震动放大效应相对较弱。II 类场地卓越周期为 0.15 ~ 0.45 s, H/V 幅值为 3.0 左右;值得注意的是, III 类场地标准曲线存在明显的“双波峰”的现象:即在 II 类场地的曲线卓越周期附近首先出现了第 1 个峰值,然后才在 0.9 s 附近达到第 2 个峰值,且幅值上和 II 类场地曲线没有明显差别。



(a) 3 类场地标准谱比曲线



(b) 3 类场地自然对数标准差曲线

图 2 3 类场地标准谱比曲线及自然对数标准差曲线

Fig.2 Standard spectral ratios and natural logarithmic standard deviations at different periods for each site class

换言之，仅考虑卓越周期和谱比幅值，无法很好地区分 II 和 III 类场地。

图 2(b)为 3 类场地自然对数标准差曲线，除长周期某几个点外，III 类场地曲线的离散性高于其余 2 类，与 III 类场地的台站数量略少有关，但 3 类场地全部均低于 0.6，与其他学者类似方法研究结果的标准差范围相仿，如 J. X. Zhao 等^[5]得到的曲线标准差为 0.25 ~ 0.61，Y. Fukushima 等^[13]的结果为 0.4 ~ 0.65，H. Ghasemi 等^[7]的结果为 0.59。本文统计的 3 类场地曲线在 0.15 s 之前，离散性较大，标准差最小的 II 类也超过了 0.4；在 0.15 s 之后，II 和 III 类的离散性均有所下降，在 1 s 之后，标准差均低于 0.3，说明在该周期段 II 和 III 类场地的离散性整体较低，本文正是通过比较在 0.15 ~ 3.00 s 段与 II、III 类场地标准曲线的形状匹配程度来判断未知场地的类别归属。

3 谱比法分类流程及应用

3.1 分类流程

利用台站记录的谱比曲线和场地标准谱比曲线进行匹配的方法已经有很多学者进行探索。早期研究提出的是单一指标法，即仅利用 H/V 谱比曲线的卓越周期指标进行分类。单一指标法没有考虑谱形的因素，如果台站记录不多或者谱比曲线存在多波峰，则很难根据卓越周期进行判断。如较为坚硬的场地，谱比曲线较为平坦，没有明显的卓越周期，判别结果的正确率较低。

近年来，基于谱形匹配原则的分类方法陆续出现，如 J. X. Zhao 等^[5]提出的谱形指标分类方法，依据谱比曲线之间的绝对差异进行分类；H. Ghasemi 等^[7]提出了基于斯皮尔曼秩相关系数的分类方法，依据谱形进行匹配，但谱形匹配方法可能会出现曲线首尾段匹配程度优于卓越周期段导致的结果误判，即“首尾叛变”现象；R. Z. Wen 等^[9]针对该问题提出了基于熵权法的决策指标，对卓越周期段的谱形匹配程度赋予了更高的决策权重，结果更为合理，但是计算过程有些复杂。

本文结合 3 类场地标准曲线的特点及其在不同周期段离散性不同的特点，经过反复尝试，借鉴前人方法，提出了一种经验分类的方法。主要采用 3 个指标来进行场地划分：台站 H/V 平均谱比曲线的峰值 P 、卓越周期 T_g ，以及该曲线在 0.15 ~ 3.00 s 范围对应 II、III 类场地标准曲线的谱形匹配指标 SI ，

SI 即为斯皮尔曼秩相关系数 ρ ， ρ 在统计学中用于衡量变量的依赖性，这里用来衡量样本曲线和平均曲线形状的相似程度^[14]。 SI 计算式为

$$SI = \rho = 1 - 6 \sum \frac{d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

式中： n 为所取的周期点数量， d_i 为第 i 个周期点处目标谱比曲线与标准谱比曲线值的差。

本文建议的经验分类方法流程如图 3 所示。

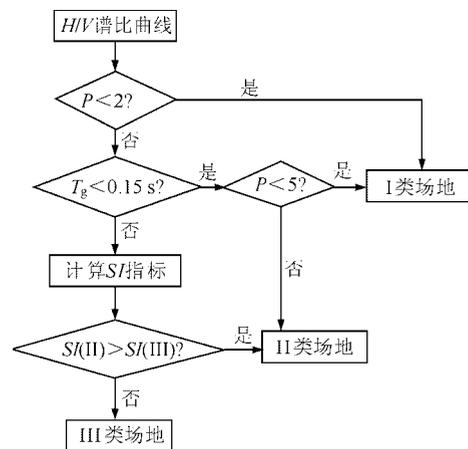


图 3 经验分类方法流程图

Fig.3 Flow chart of the empirical method for site-classification

判别的要点和依据为：

(1) 部分属于 I 类场地的硬土或基岩场地的 H/V 谱比曲线较为平坦，卓越周期较难识别，曲线幅值整体偏小。如果 H/V 谱比曲线峰值 $P < 2.0$ ，则直接认定该场地为 I 类场地^[6]。

(2) 从平均谱比曲线可以明显看出，II 类场地的卓越周期段为 0.15 ~ 0.45 s。II 类场地存在一种特殊情况，当基岩上覆土层相对较薄，阻抗比较大时，其卓越周期可能低于 0.15 s，但谱比峰值会比一般的 I 类场地偏大很多。对研究的台站统计发现，小于 0.15 s 周期段 II 和 I 类场地谱比峰值的平均值分别为 3.1 和 4.5，考虑到结果的离散性，出于保守考虑，规定卓越周期小于 0.15 s 且谱比峰值大于 5 的场地划为 II 类，该周期段的其余场地划为 I 类。

(3) II 和 III 类场地的卓越周期部分重叠，仅依靠卓越周期来判断二者归属很容易误判，并不可靠。但二者的曲线谱形差异较明显，且在 0.15 ~ 3.00 s 范围离散性水平较低，因此以该周期段的 SI 谱形匹配指标作为判断依据来划分 II 和 III 类场地。

3.2 方法验证

为了评估该分类方法的可靠性，对节 2 用来进行统计 H/V 标准谱比曲线的 279 个日本强震台站进行场地类别验证，通过与钻孔分类结果的匹配程度

来衡量正确率。为避免样本中不同类别场地台站数量不同带来的权重影响,本文以钻孔结果作为条件,划分场地类别正确率 Q 的计算式为

$$Q = P(\text{场地计算结果为}X\text{类}/\text{钻孔结果为}X\text{类}) = \frac{\text{计算结果与钻孔结果均为}X\text{类的台站数量}}{\text{钻孔结果为}X\text{类的台站数量}} \quad (3)$$

I, II, III 类的正确率 Q 分别为 :63.3% ,61.4% ,61.5%。I 类场地被误分为 II 和 III 类的比例为 23.3% 和 13.3% ;II 类场地被分为 I 和 III 类的比例为 29.6% 和 8.9% ;III 类场地没有被误分为 I 类的情况,被误分为 II 类的比例为 38.5%(见图 4)。可以看出,我国 II 类场地定义过于宽泛,3 类场地的条件正确率均达到 60% 以上,说明还是较好把握住了 3 类曲线的特点,其误判率在可以接受的范围,本方法可行。

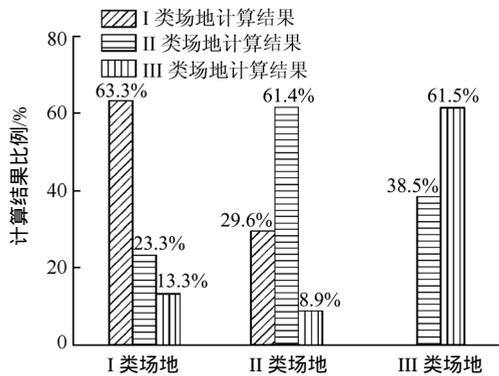


图 4 3 类场地计算结果比例

Fig.4 Percentage of calculation result for three classes of site

为了进一步验证该分类方法是否具有地域上的局限性,选取了 2008 年汶川地震中的 383 次余震触发的 54 个台站,1 982 组三分量记录作为研究对象,分别计算各个台站的 H/V 平均谱比曲线,然后用本文方法进行分类。分类结果为 I 类场地台站 14 个,II 类场地台站 31 个,III 类场地台站 9 个。具有钻孔资料的 37 个台站共成功分类了 25 个,正确率超过 67.5%,证明该方法的区域局限性不大,可以用于中国大陆台站的场地分类。

3.3 方法应用

本文收集了 2007 ~ 2011 年我国数字强震台网中 642 个台站的 1 515 组强震记录(不含汶川主余震序列),均统一采用本文的记录处理与筛选方法,对强震记录条数大于 3 条的台站进行进一步分类,筛选后可用数据为 113 个台站的 530 组记录,最大震源距 315 km,最大震级 $M_s6.8$ 。

完成分类的台站主要集中在云南,四川,新疆,青海和宁夏等地,113 个台站中 I 类场地 14 个,II 类场地 63 个,III 类场地 36 个。同时,经过现场调

查,排除了相关省份强震台站位于 IV 类场地的可能性。

分类完成后,计算出中国 3 类场地的 H/V 平均曲线,与节 2 据 KiK-net 台网数据得到的 H/V 标准谱比曲线进行对比,结果见图 5(a)。可以看出 I 和 III 类场地在谱比曲线形状,放大幅值和卓越周期范围上均基本吻合。II 类谱比曲线的变化趋势一致,但曲线幅值上有些差别,中国台站的 II 类场地平均谱比曲线最大幅值约为 3.3,而日本台站的 II 类场地平均谱比曲线的最大幅值约为 2.7。这种差异的主要原因是中国台站的分类结果并非根据钻孔资料获得,完全是基于强震记录的一种分类结果。考虑到实际匹配时,主要参数是谱形匹配指标 SI ,即根据曲线形状进行判断,因此幅值上该程度的差异对本文方法的使用影响不大。将中国 3 类场地曲线的标准差曲线绘制于图 5(b)中,与节 2 基于 KiK-net 台站数据计算的标准差对比,可以看出标准差的变化范围很接近,最大标准差低于 0.55,且大部分周期范围标准差都低于 0.4。平均曲线和标准差曲线的对比结果从另一个角度验证了本文分类方法得出的结果较为可靠。

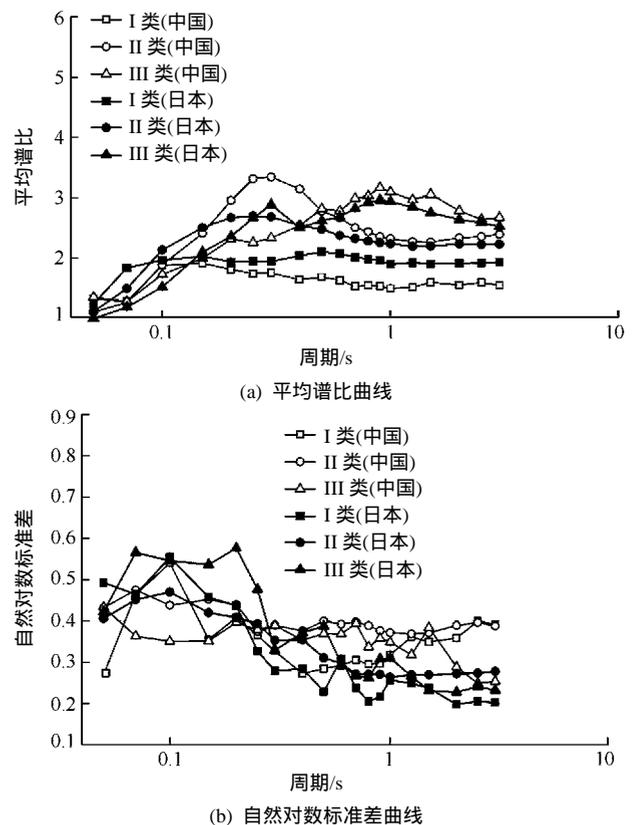


图 5 中国与日本 3 类场地平均谱比曲线与自然对数标准差曲线

Fig.5 Curves of average spectrum and natural logarithmic standard deviation for three classes of site in China and Japan

4 结 论

本文采用 KiK-net 台网强震数据，计算了中国不同类别场地的 H/V 标准谱比曲线后，考虑了场地卓越周期、谱比峰值和谱形差异 3 方面的因素，在不同的周期段采用不同的优先指标来判断，实现了中国强震台站场地分类。该方法应用于参考样本下的条件正确率超过 60%。采用本文方法对中国汶川地震中余震触发台站进行分类，经过钻孔资料确认，场地分类的正确率较高，证明中日的区域性差异对该分类方法的影响并不很大，可以利用本文方法进行中国场地分类。本文的研究工作对于目前我国强震数据的选取与应用具有重要的参考价值，主要表现在：

(1) 首次给出我国抗震规范 3 类场地的 H/V 谱比标准曲线以及相应的标准差，在目前我国强震台站场地资料比较匮乏的情况下，该曲线可以作为场地分类的参考，为工程抗震中强震记录的选取提供基础场地信息。

(2) 利用谱比曲线卓越周期、谱比峰值以及衡量谱形匹配程度的斯皮尔曼秩相关系数 3 个指标，改进了基于强震记录匹配场地类别的经验方法，经验证结果较为稳定。

(3) 利用中国数字强震台网于 2007 ~ 2011 年获得的强震记录，对 113 个台站场地进行了分类，得到的 3 类场地标准谱比曲线和原标准谱比曲线形状与趋势一致。

我国抗震规范的场地分类依据等效剪切波速和覆盖层厚度，而本文的方法强调了场地的地震动特性，二者对于场地类别的判别结果存在差异是必然的，更可靠的中国场地 H/V 平均谱比曲线有待钻孔资料以及强震资料的进一步积累来完善，就目前来说，本文给出的结果基本可以满足我国地震工程相关工作的需要。

致谢 日本 KiK-net 网站、美国 PEER 网站和中国地震局工程力学研究所强震台网中心提供了强震观测数据。甘肃省地震局、云南省地震局、四川省地震局和新疆维吾尔自治区地震局以及其他省级单位从事强震观测的同志对分类的结果提出了宝贵意见。

参考文献(References)：

[1] 中华人民共和国国家标准编写组. GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.(The National Standards

- Compilation Group of People's Republic of China. GB50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing：China Building Industry Press，2010.(in Chinese))
- [2] 中华人民共和国国家标准编写组. GB17741—2005 工程场地地震安全性评价[S]. 北京：中国标准出版社，2005.(The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 17741—2005 Evaluation of seismic safety for engineering sites[S]. Beijing：Standards Press of China，2005.(in Chinese))
- [3] NAKAMURA Y. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Railway Technical Research Institute，1989，30(1)：25—33.
- [4] YAMAZAKI F, ANSARY M A. Horizontal-to-vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics，1997，26(7)：671—689.
- [5] ZHAO J X, IRIKURA K, ZHANG J. An empirical site-classification method for strong-motion stations in Japan using H/V response ratio[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2006，96(3)：914—925.
- [6] ALESSANDRO C D, BONILLA L F, BOORE D M, et al. Predominant-period site classification for response spectra prediction equations in Italy[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2012，102(2)：680—695.
- [7] GHASEMI H, ZARE M, FUKUSHIMA Y, et al. Applying empirical methods in site classification，using response spectral ratio(H/V)：A case study on Iranian strong motion network(ISMN)[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering，2009，29(1)：121—132.
- [8] WEN R Z, REN Y F, ZHOU Z H, et al. Preliminary site classification of free-field strong motion stations based on Wenchuan earthquake records[J]. Earthquake Science，2010，23(1)：101—110.
- [9] WEN R Z, REN Y F, SHI D C. Improved HVSR site classification method for free-field strong motion stations validated with Wenchuan aftershock recordings[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration，2011，10(3)：325—337.
- [10] 郭 锋. 抗震设计中有关场地的若干问题研究[硕士学位论文][D]. 武汉：华中科技大学，2010.(GUO Feng. Research on some issues of site for seismic design[M. S. Thesis][D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2010.(in Chinese))
- [11] BOORE D M. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi,Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，2001，91(5)：1 199—1 211.
- [12] BERESNEV I A, WEN K L. Nonlinear soil response—a reality?[J]. Bulletin of the Seismological Society of America，1996，86(6)：1 964—1 978.
- [13] FUKUSHIMA Y, BONILLA L F, SCOTTI O, et al. Site classification using horizontal-to-vertical response spectral ratios and its impact when deriving empirical ground-motion prediction equations[J]. Journal of Earthquake Engineering，2007，11(5)：712—724.
- [14] SPEARMAN C. The proof and measurement of association between two things[J]. The American Journal of Psychology，1904，15(1)：72—101.