

科技部国家重点实验室基础研究资助项目 (编号: SLDRCE08-B-01)

2008.5.12

汶川地震震害研究

同济大学土木工程防灾国家重点实验室 主编

科技部国家重点实验室基础研究资助项目(编号:SLDRCE08-B-01)

汶川地震震害研究

同济大学土木工程防灾国家重点实验室 主编

图书在版编目(CIP)数据

汶川地震震害研究/同济大学土木工程防灾国家重点
实验室主编. --上海:同济大学出版社,2011.12

ISBN 978-7-5608-4713-9

I. ①汶… II. ①同… III. ①地震灾害—研究—四川
省 IV. ①P315.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 221765 号

汶川地震震害研究

主 编 同济大学土木工程防灾国家重点实验室

责任编辑 杨宁霞 荆 华 责任校对 徐春莲 封面设计 潘向葵

出版发行 同济大学出版社 www.tongjipress.com.cn
(地址:上海市四平路 1239 号 邮编:200092 电话:021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 苏州望电印刷有限公司
开 本 889mm×1194 mm 1/16
印 张 12.25
印 数 1—1100
字 数 392 000
版 次 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5608-4713-9

定 价 80.00 元



编 委 会

顾 问 范立础

主 任 楼梦麟 叶爱君

成 员(按姓氏笔划排序):

孙立军 吕西林 李风亭 李 杰

李建中 袁 勇 顾祥林 唐益群

钱 锋

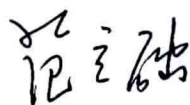
序 言

Prologue

近二十年来,全球地震频发,灾难巨大,我国也未能幸免。2008年的汶川大地震、2010年的青海玉树地震都造成了大量的严重的工程破坏,导致了极其惨重的生命财产损失。要减轻地震灾害,主要途径就是要设法提高工程的抗震能力,换言之,要对工程结构进行正确的抗震设防和抗震设计。

调查工程震害,并分析震害产生的原因是建立正确的抗震设计方法、采取有效抗震措施的科学依据。所以,在每一次地震灾难过后,除了灾后重建外,作为工程领域的科技工作者,还应珍惜地震灾难留下的极其宝贵的震害资料,继续对地震造成的工程震害进行深入细致的分析研究,反省现有的抗震设计方法和设计规范,使工程抗震设计水平不断地得到提高。

在2008年汶川大地震发生之后,同济大学先后数十次派出震害考察调研组,在地震灾区深入调查研究,并编写出版了《汶川地震震害》一书,为今后工程抗震研究提供了初始宝贵的震害资料。之后三年,同济大学师生们并未停止对汶川地震震害的分析和思考,不断地收集相关资料,从汶川地震的地震动特性、桥梁结构的震害分析和抗震策略、各种房屋和校舍的震害和结构抗震修复等方面,展开了进一步的科学研究,取得了一些成果。同济大学土木工程防灾国家重点实验室现将这些研究成果集结出版,期望能为我国今后的工程抗震设计提供借鉴和参考。



同济大学土木工程防灾国家重点实验室

荣誉资深教授

中国工程院院士

2011年11月

目 录

Contents

序言

- 001 汶川 8 级地震近场强震记录特征分析 / 李英成 陈清军
- 008 汶川地震基岩地震动特征分析 / 楼梦麟 杨燕
- 020 汶川地震简支梁桥地震震害分析及对策研究 / 李建中
- 034 桥梁减震策略研究
——从汶川地震震害分析桥梁减隔震支座的设计问题 / 张于晔 袁万城 韦正华,等
- 044 灾后重建轻型木结构小学整体抗震性能研究 / 何敏娟 周楠楠 熊海贝,等
- 062 现有中小学学校校舍抗震缺陷的统计分析 / 任晓崧 李庞 王伟良
- 077 青川县青溪镇“5·12”汶川特大地震农房震害调查及灾后重建 / 陈世鸣 陈建职
- 089 某钢筋混凝土框架震害分析及消能减震技术在震后结构修复中的应用
/ 翁大根 彭林海 张超,等
- 119 现浇楼梯对钢筋混凝土框架结构抗震性能影响分析 / 蒋欢军 王斌
- 140 关于砌体结构的抗震能力 / 任晓崧 王伟良 李庞
- 152 上海远场强震时人工地震波的合成 / 杨燕 楼梦麟
- 169 上海临近潜在震源发生 8 级强震时高层建筑地震反应分析 / 杨燕 楼梦麟

汶川 8 级地震近场强震记录特征分析

李英成 陈清军

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要 在汶川 8 级地震中, 中国数字强震动台网位于断层附近的 11 个台站得到了近场强震记录。基于这些强震记录, 本文对其竖向与水平向加速度峰值比、竖向与水平向反应谱比值以及能量时频分布特征进行了分析。初步结果表明: 在本文所选取的强震记录中, 竖向与水平向加速度峰值比在汶川卧龙站最大达到 1.45; 竖向与南北水平向加速度峰值比平均达到 0.99; 竖向与东西水平向加速度峰值比平均达到 0.85, 大于一般认为的 $1/2 \sim 2/3$ 水平; 基岩台站能量时频分布多集中在 10 Hz 以上, 较土层台站能量集中的频率区段 5~10 Hz 要高; 竖向地震动的 CF 值较水平向小, 说明竖向地震动的能量随时间和频率的分布更为集中。

关键词 汶川 8 级强震记录; 近场地震动特征; 竖向与水平向峰值比; 竖向与水平向反应谱比值; 能量时频分布

Analysis on Characteristics of Near-fault Strong Motions of Wenchuan 8 Earthquake

LI Yingcheng, CHEN Qingjun

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract In the Wenchuan 8 earthquake, thirty three near-fault ground motions were obtained from eleven near-fault stations of China Strong Motion Net Center (CSMNC). Based on these ground motions, the acceleration peak ratios, vertical to horizontal acceleration response spectral ratio and the energy time-frequency distribution of these motions were analyzed. The preliminary results show that the most value of vertical to horizontal acceleration peak ratios from wenchuan wolong station is 1.45, the mean of vertical to north-south horizontal acceleration peak ratio is 0.99, the mean of vertical to east-west horizontal acceleration peak ratio is 0.85, which is bigger than normal lever $1/2 \sim 2/3$. The energy time-frequency distribution of rock station is concentrate on 10 Hz or higher frequency mostly, which is higher than frequency distribution 5 Hz~10 Hz of soil station. The CF value of vertical component motions are smaller than horizontal component motions, which means that component energy distribution by time-frequency is more concentrated.

Key words Wenchuan 8 earthquake motions; characteristics of near-fault strong motions; vertical to horizontal acceleration peak ratio; vertical to horizontal acceleration response spectral ratio; energy time-frequency distribution

汶川 8 级地震是新中国成立以来破坏性最强、波及范围最广的一次地震, 地震的强度、烈度都超过了唐山大地震, 国家强震动台网中心分布在全国各地的台站也在此次地震中获得了大量的强震记录, 为工程抗震设计研究提供了重要的基础资料。李小军、于海英等对这些强震记录进行了初步分析, 得到了加速度峰值及反应谱衰减规律等^[1]; 周正华、温瑞智等对宜宾高昌台站有异常的记录进行了分析, 得到其产生异常的原因^[2]; 徐杨等也基于远场强震动记录进行了长周期地震动特性的研究^[3]。上述分析中并没有对近场地震动进行单独的分析, 而近场地震动作为一种最复杂且造成破坏性最大的地面运动, 具有不同于其他强震记录的显著特征, 研究这些特征对于提高近场地区工程结构抗震水平有着重要的意义^[4]。此外, 李小军等对汶川强震数据进行谱分析都是基于傅里叶分析方法。该方法基于地震动为类平稳的假定, 即频率不随时间变化的假定。而地震动是一种典型的非平稳地震动, 用时频分析的方法来描述其能量分布特征已成为地震动谱分析的一种趋势。

基金项目: 科技部国家重点实验室基础研究资助项目 (SLDRCE08-B-03)。

作者简介: 李英成, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要研究方向为工程结构抗震, E-mail: liyingcheng2006@163.com

本文对位于断层附近的 11 个台站获得的汶川地震近场强震记录进行了研究,考察其竖向水平向加速度峰值比、竖向水平向反应谱比值 V/H 等,并与《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010^[5]中关于竖向地震动的规定进行了比较,给出相关的建议。基于处理非平稳信号的正交化 Hilbert-Huang Transform (简称正交化 HHT)方法^[6,7]对此次汶川地震近场强震记录进行时频特性分析,得到反映地震动能量随时间频率分布的局部功率谱密度函数及反映能量在时间频率上集中程度的峰值系数等,以考察近场地震动能量时频分布特征。

1 近场强震记录概况

中国数字强震动台网的 420 个台站在汶川地震中获得了强震动记录,其中四川省内台站 131 个,其他省市台站 289 个,随后国家强震动台网中心发布了相关的未校正加速度记录。为考察此次地震近场地震动的特征,本文选取位于断层附近的 11 个台站进行分析,其台站位置如图 1 所示,场地条件、震中距等信息列于表 1 中。

在所获得的所有强震记录中,离断层最近的台站为四川绵竹清平台站,距断层 1.05 km,其 EW 向加速度峰值达到 824 gal($1\text{ gal}=10^{-2}\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)。距离震中最近的汶川卧龙站获得了最大加速度峰值记录,其 EW 向加速度峰值达到 958 gal。在对这些加速度记录进行分析前,作者基于最小二乘法对未校正加速度记录进行了基线调整。较为遗憾的是,位于断层附近的 11 个台站中只有一个台站位于基岩之上,其他台站场地条件都是土层,使得考察不同场地条件对近场地震动特性地震动特性的影响变得较为困难。

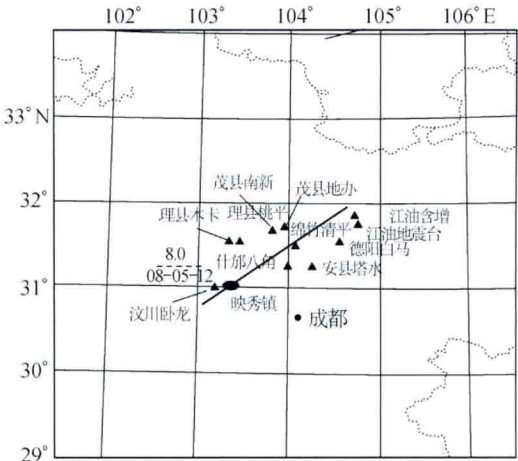


图 1 台站分布示意图

2 加速度峰值比统计分析

在抗震设计中,有时需要考虑竖向地震动对结构地震反应的影响,而这一影响又常常是按水平地震动的某一比例规定的,在一般情况下,公认的结果是竖向加速度峰值为水平向峰值的 $1/2\sim 2/3$ ^[8]。然而,近年来的几次地震,如美国 1989 年 Loma Prieta 地震、1994 年 Northridge 地震,我国 1999 年台湾集集地震及 2001 年施甸地震等在接近震中或发震断层附近产生了较强的竖向地震动,其中有一些竖向加速度峰值甚至超过了水平向加速度峰值^[9]。为了研究汶川地震近场竖向加速度峰值与水平向加速度峰值间的关系,本文对获得的 33 条近场强震记录加速度峰值进行了统计分析,分析结果如表 1 所示。

表 1 近场强震记录加速度峰值比统计结果

台 站	经度/(°)	纬度/(°)	场地条件	震中距/km	加速度峰值/gal			竖向水平峰值比	
					UD	EW	NS	UD/EW	UD/NS
安县塔水(AXT)	104.3	31.5	土层	98	179.93	289.54	203.45	0.62	0.88
德阳白马(DYB)	104.5	31.3	土层	104	88.99	126.29	136.33	0.70	0.65
江油地震台(JYD)	104.7	31.8	土层	147	198.28	511.33	458.68	0.39	0.43
江油含增(JYH)	104.6	31.8	土层	140	444.33	519.49	350.14	0.86	1.27

续 表

台 站	经度/(°)	纬度/(°)	场地条件	震中距/km	加速度峰值/gal			竖向水平峰值比	
					UD	EW	NS	UD/EW	UD/NS
理县木卡(LXM)	103.3	31.6	土层	67	357.81	320.94	283.84	1.11	1.26
理县桃平(LXT)	103.5	31.6	土层	67	379.58	339.73	342.38	1.12	1.11
茂县南新(MXN)	103.7	31.6	土层	72	352.48	421.28	349.24	0.84	1.01
绵竹清平(MZQ)	104.1	31.5	土层	84	622.91	824.12	802.71	0.76	0.78
什邡八角(SFB)	104.0	31.3	土层	63	633.09	556.17	581.59	1.14	1.09
汶川卧龙(WCW)	103.2	31	土层	18	948.10	957.70	652.85	0.99	1.45
平均值								0.85	0.99
茂县地办(MXT)	103.9	31.7	基岩	90	306.57	302.16	266.64	0.87	0.88

从表 1 可以看出:由于断层破裂方向所致,土层场地上的水平 EW 向加速度峰值一般比 NS 向要大,表现出近场地震动方向性效应。相对应的竖向与水平向加速度峰值比平均达到 0.99,也较 UD 向/EW 向的平均值 0.85 更大,且大于一般认为的 $1/2 \sim 2/3$ 范围内的值的水平。而从竖向水平向加速度峰值比的变化也知,越靠近震中的台站由于受到体波的影响,其竖向加速度峰值比会越大。同时,当距离震中一段距离之后,由于体波衰减迅速,瑞利波和乐夫波将会占据主导地位,从而导致竖向水平向加速度峰值比变小。基岩场地获得的强震记录只有茂县地办台站,其竖向与水平向加速度峰值比与土层场地上的平均值相当,表明不同场地条件对近场地区强震记录竖向与水平向加速度峰值比的影响不大。由于此次汶川地震所获得近场强震记录有限,分析数据具有较大的离散性,加速度峰值比统计特性尚待用更多的近场强震加速度记录加以验证。

3 加速度反应谱分析

分别对 10 个土层场地台站 EW 向、NS 向、UD 向的加速度记录求动力放大系数 β 谱 ($\xi = 0.05$), 即平均后得到土层场地平均动力放大系数 β 谱和 1 个基岩场地台站上的 β 谱及《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010 中所规定的 β 谱(选取场地特征周期 $T_g = 0.3$ s), 三方向的 β 谱分别如图 2 所示。同时,为得到竖向与水平向地震反应谱比特征,先对每一个台站的 UD 向加速度动力放大系数谱与 EW 向、NS 向加速度动力放大系数谱求比值,然后对谱比值进行平均得到 UD/EW, UD/US 两组平均谱比值系数 V/H 随周期变化的特征,分别如图 3 所示。

从图 2 可以看出:土层场地台站水平向反应谱特征周

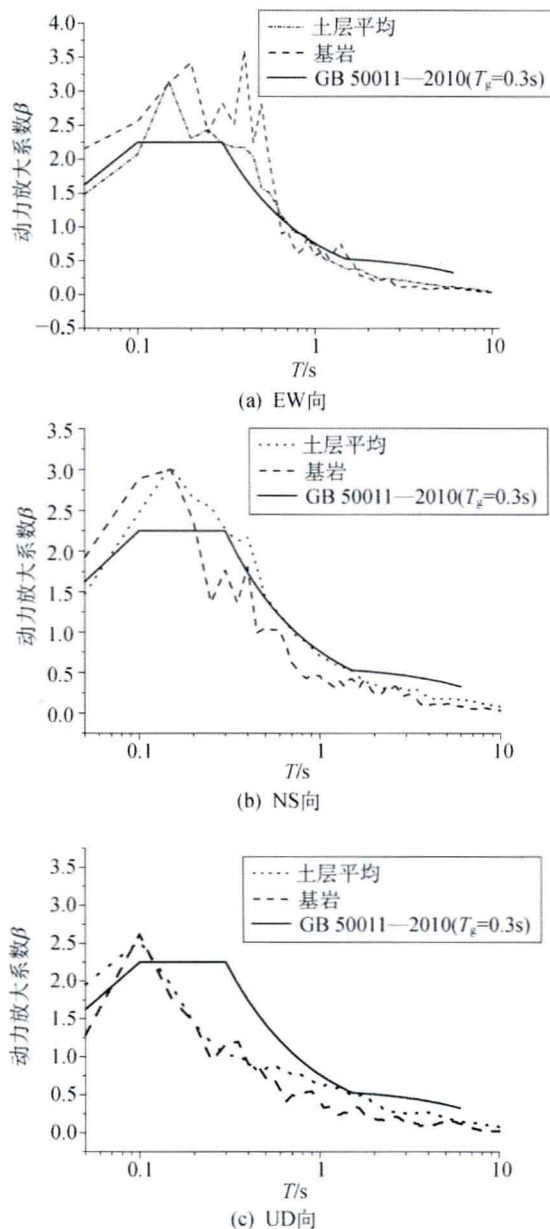


图 2 近场加速度记录平均反应谱

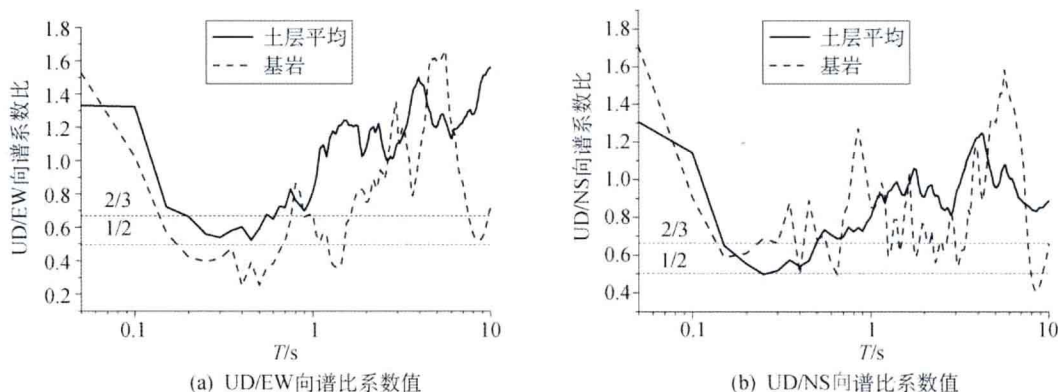


图3 近场加速度记录竖向与水平向谱比系数值

期在 0.2~0.4 s 之间,而竖向地震动的特征周期只有 0.1~0.2 s,都表现出近场地震动高频含量丰富的特征,尤其是竖向地震动更多表现出含高频率体波成分丰富的特征;同样,基岩台站反应谱也与土层台站具有相似的特点。这也与近场地区民房(自振周期为 0.2 s 左右)受损更加严重的震害调查相符。同时,对比近场水平向地震动的动力放大系数 β 谱与建筑抗震规范中 β 谱可以发现,在短周期段 ($T < 1$ s), β 值均大于规范值,而在长周期段则小于规范值。从而可以说明在应用建筑抗震规范考虑水平向地震力进行近场地区结构抗震设计时,对于短周期结构可能低估了地震破坏力,而对于长周期结构则可能会趋于保守。

在图 3 中,两条虚线对应抗震规范中对于竖向地震力的规定值范围(取水平向反应谱乘一个在 1/2~2/3 范围内的值的系数)。由于基岩场地仅有一个台站获得记录,对比基岩场地和土层场地两种不同场地在 EW, NS 两个不同方向的 V/H 值的区别并无明显规律。而对土层场地,当周期小于 1 s 时,其竖向地震动与水平向地震动反应谱比 V/H 值基本包含在规范中规定的 1/2~2/3 之内,而当周期增大时,由于竖向地震动反应谱衰减比水平向地震动反应谱衰减要慢, V/H 值会逐渐变大,当周期大于 1 s 后, V/H 值总体上要大于 1,表明近场地区进行长周期结构抗震设计时。

4 能量时频分布特征分析

地震工程领域对强震记录进行谱分析最常采用傅里叶分析方法,而傅里叶分析方法是基于地震波为类平稳过程的假定,近场强震记录作为一种典型的非平稳过程,用时频的方法来描述其能量分布特征已成为地震动谱分析的一种趋势。正交化的 HHT 法由于具有较好的客观性、内在性与自适应性,对信号的非线性反映能力较好,适合于对具有非线性和非平稳动态变化特征的地震信号的描述与刻画。通过将 EMD 分解得到的各阶 IMF 分量进行正交化处理,得到完全正交的各阶 IMF 分量^[5],对于正交后的任一 IMF 分量 $c^*(t)$ 作 Hilbert 变换即得到 $\hat{c}^*(t)$:

$$\hat{c}^*(t) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c^*(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (1)$$

式中, P 代表柯西主值。则对于 $c^*(t)$ 的解析信号 $z(t)$ 为

$$z(t) = c^*(t) + i \hat{c}^*(t) = a(t) e^{i\theta(t)} \quad (2)$$

$a(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别为信号的瞬时频率和瞬时相位,按下式计算:

$$a(t) = \sqrt{c^{*2}(t) + \hat{c}^{*2}(t)} \quad (3)$$

$$\theta(t) = \arctan(\hat{c}^*(t)/c^*(t)) \quad (4)$$

把信号振幅显示在频率-时间平面上,就可以得到 Hilbert 幅值谱 $H(\omega, t)$,称为 Hilbert 谱,记作

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{j=1}^n a_j(t) e^{i \int \omega_j(t) dt} \quad (5)$$

通过正交化 HHT 方法可以得到随机信号的 Hilbert 谱,考虑原随机信号和解析信号的关系,以能量的观点,可得反映原随机信号时-频特性的局部功率谱密度

$$S(t, \omega) = |H(t, \omega)|^2 / 2 \quad (6)$$

通过地震波信号的 Hilbert 谱与局部谱密度的这种简单的关系,不仅避免了能量的泄露,同时使利用正交 HHT 变换进行局部谱密度的估计非常方便。公式(6)具有明确的物理意义,即在时刻 t 、频率 ω 处随时间过程的功率谱密度函数,与平稳过程的功率谱密度函数相比,增加了时间信息。

如果以频率-时间平面为自变量定义域来观察 Hilbert 谱三维分布图,可以找到有能量意义的二维平稳度指标^[11],即首先定义二维平面上信号的均值,均方根分别为

$$\overline{H(\omega, t)} = \frac{\int_0^t \int_0^\omega H(\omega, t) d\omega dt}{\omega t} \quad (H(\omega, t) \geq 0) \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{E[(H(\omega, t) - \overline{H(\omega, t)})^2]} \quad (8)$$

这样,对每一个非平稳且包含着多种频率成分的宽带地震动而言,就有了一个统计其 Hilbert 谱涨落特性的综合指标,这一指标不是只对频率或者只对时间的单一因素指标,而是与其能量特性明确相关的综合物理量^[11]。

为比较不同地震波能量的涨落特性,这里采用文献[11]的峰值系数,将它定义为最大信号幅值与均方根之比的 10 倍自然对数,即

$$CF = 10 \ln \frac{\max |H(\omega, t)|}{\sqrt{E[(H(\omega, t) - \overline{H(\omega, t)})^2]}} \quad (9)$$

对于不同的地震波来说,最大能量密度函数越大,它对于结构的冲击就越大,那么结构发生破坏的可能性也就越大。而峰值系数 CF 可显示出 Hilbert 谱的涨落程度,地震波峰值系数 CF 越小,能量越集中。

文献[10]基于正交化 HHT 方法对特殊长周期地震动进行了能量分布研究,验证了该方法的合理性。本文对此次汶川地震近场强震记录能量分布进行了研究。限于篇幅,这里只给出获得最大加速度峰值记录的汶川卧龙站三方向加速度时程曲线及局部功率谱密度函数 $S(t, \omega)$ 谱,如图 4、图 5 所示。

从卧龙站三方向的时程曲线及功率谱密度函数谱可以看出:其加速度强震记录峰值出现在 EW 向达到 958 gal ($1 \text{ gal} = 10^{-2} \text{ m/s}^2$), NS 向加速度峰值为 948 gal,竖向 UD 向峰值为 653 gal;且其局部功率谱表现出明显的非平稳特性,频率随时间的变化明显。加速度时程局部功率谱密度函数 $S(t, \omega)$ 谱是时间-频率-能量三维谱,可以从能量的角度考察近场地震动的非平稳特征。为了考察此次汶川地震近场强震记录的

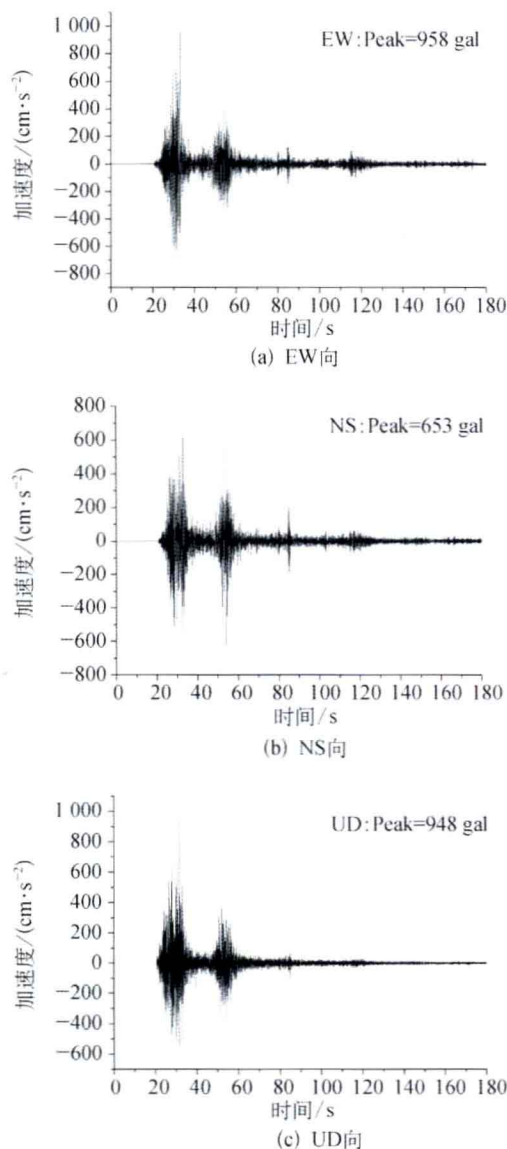


图 4 汶川卧龙站加速度记录

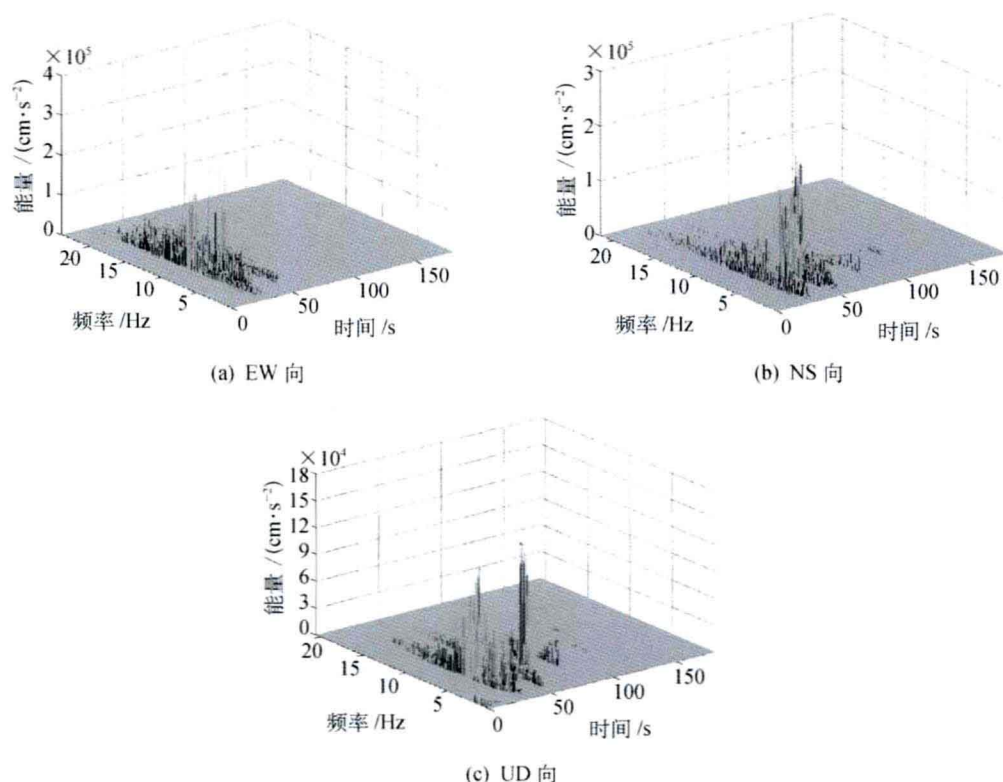


图5 汶川卧龙站三方向加速度记录的局部功率谱密度函数

非平稳特征,表2给出了33条近场强震记录的局部功率谱密度函数 $S(t, \omega)$ 峰值及反映其能量随时间和频率分布涨落特性的综合指标 CF 值的统计结果。

表2 近场强震记录非平稳特征值统计结果

台站	局部功率谱密度函数 $S(t, \omega)$ 峰值/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-3})$			最大振幅 $H(t, \omega)/$ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$			峰值系数 CF			竖向水平向峰值 系数 CF 值比	
	EW	NS	UD	EW	NS	UD	EW	NS	UD	UD/EW	UD/NS
安县塔水(AXT)	2.5E+04	2.0E+04	3.4E+03	225.1	199.4	82.6	35.83	38.26	33.54	0.94	0.88
德阳白马(DYB)	4.1E+03	3.0E+03	3.1E+03	90.8	77.2	79.1	34.97	33.66	36.81	1.05	1.09
江油地震台(JYD)	2.0E+05	5.9E+04	1.2E+04	632.8	344.8	157.0	40.46	37.14	36.04	0.89	0.97
江油含增(JYH)	1.4E+05	6.4E+04	3.9E+04	522.1	357.9	280.2	38.31	38.74	36.54	0.95	0.94
理县木卡(LXM)	4.5E+04	4.9E+04	2.6E+04	301.4	313.8	229.6	36.99	38.98	37.38	1.01	0.96
理县桃平(LXT)	7.4E+04	1.0E+05	7.3E+04	385.2	453.3	381.5	40.37	41.37	38.85	0.96	0.94
茂县南新(MXN)	8.3E+04	2.9E+04	2.2E+04	407.8	240.1	211.8	38.89	35.78	35.50	0.91	0.99
绵竹清平(MZQ)	1.5E+05	2.6E+05	1.0E+05	543.8	715.1	453.6	35.85	38.58	37.85	1.06	0.98
什邡八角(SFB)	2.9E+05	2.3E+05	1.0E+05	762.7	673.5	449.8	40.34	37.98	37.66	0.93	0.99
汶川卧龙(WCW)	3.2E+05	2.4E+05	1.2E+05	804.5	688.7	487.3	37.61	40.98	35.96	0.96	0.88
平均值							37.96	38.15	36.61	0.97	0.96
茂县地办(MXT)	4.3E+04	5.5E+04	1.3E+04	292.7	333.0	159.7	38.03	39.55	36.01	0.95	0.91

表2给出的此次汶川地震中获得的近场强震记录的非平稳特征值的统计结果表明:获得最大加速度峰值记录的汶川卧龙台站EW分量局部功率谱密度函数 $S(t, \omega)$ 峰值也最大,为 $3.2\text{E}+05 \text{ cm}^2/\text{s}^3$,其次为什邡八

角台站 EW 分量和汶川卧龙台站 NS 分量,分别为 $2.9\text{E}+05\text{ cm}^2/\text{s}^3$ 和 $2.4\text{E}+05\text{ cm}^2/\text{s}^3$;且各个台站竖向的 $S(t, \omega)$ 峰值一般都小于水平向,说明同一台站水平向地震动较竖向地震动对于结构的冲击可能更大。同时,通过对各台站各分量的峰值系数 CF 值的分析表明:峰值系数 CF 最小的为安县塔水台站 UD 分量为 33.54,最大的理县桃平台站 NS 分量为 41.37;各台站竖向地震动的 CF 值一般较水平向小,说明竖向地震动的能量随时间和频率的分布更为集中。其中, CF 值最小的是安县塔水台站 UD 分量而不是获得最大加速度峰值的汶川卧龙台站 NS 分量,则说明了加速度时程峰值最大的记录并不意味着能量在时间频率上也最集中。

5 结论

本文对汶川 8 级地震中位于断层附近的 11 个台站获得的 33 条近场强震记录进行了分析,得到了以下的初步结论:

(1) 在本文所选取的强震记录中,竖向与水平向加速度峰值比在汶川卧龙站最大达到 1.45;竖向与南北水平向加速度峰值比平均达到 0.99;竖向与东西水平向加速度峰值比平均达到 0.85,大于一般认为的 $1/2 \sim 2/3$ 水平。

(2) 水平向加速度动力放大系数 β 谱在短周期段 ($T < 1\text{ s}$), β 值大于规范值,而在长周期段则小于规范值。当周期小于 1 s 时,竖向水平向地震动反应谱比 V/H 值基本包含在规范规定的 $1/2 \sim 2/3$ 之内,而当周期增大时, V/H 值会逐渐变大,且总体上要大于 1。

(3) 对近场记录的能量时频分布特征分析表明,同一台站水平向地震动较竖向地震动能量峰值更大,对于结构的冲击也可能更大。而竖向地震动的 CF 值一般较水平向小,说明竖向地震动的能量随时间和频率的分布更为集中。

需要说明的是,近场地震动是一种非常复杂的地面运动,由于此次汶川地震获得的近场地震动相对有限,针对此次近场地震动分析得出的相关结论尚待用更多的近场强震加速度记录加以验证。

参考文献

- [1] 李小军,周正华,于海英,等.汶川 8.0 级地震强震动观测及记录初步分析[C]//汶川地震建筑震害分析与重建研讨会,北京,2008.
- [2] 徐扬,赵晋泉,李小军,等.基于汶川地震远场强震动记录的厚覆盖土层对长周期地震动影响分析[J].震灾防御技术,2008,3(4):345-351.
- [3] 周正华,温瑞智,卢大伟,等.汶川地震中强震动台基墩引起的记录异常分析[J].应用基础与工程科学学报,2010,18(2):304-312.
- [4] 刘启芳,袁一凡.近断层地震动的基本特征[J].地震工程与工程振动,2006,6(1):1-10.
- [5] 中华人民共和国国家标准.GB 5011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国工业建筑出版社,2010.
- [6] Huang N E. The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Pro R Soc London, 1998,454:903-906.
- [7] 楼梦麟,黄天立.正交化经验模式分解方法[J].同济大学学报:自然科学版,2007,35(3):293-298.
- [8] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,1988.
- [9] 周正华,周雍年.强震近场加速度峰值比和反应谱统计分析[J].地震工程与工程振动,2002,22(3):15-18.
- [10] 陈清军,李英成,胡灿阳.基于正交化 HHT 法的特殊长周期地震动能量分布研究[J].力学季刊,2010,31(4):548-554.
- [11] 刘强,周瑞忠,刘宇航.基于 Hilbert-Huang 变换分析的地震动能量与震动效应评估[J].力学与实践,2008,30(5):19-23.

汶川地震基岩地震动特征分析

楼梦麟 杨 燕

(同济大学土木工程防灾国家重点实验室,上海 200092)

摘 要 根据我国 44 个台站获得的汶川地震主震中获得的基岩自由地表地震动记录,分析了基岩地震波的加速度峰值、频谱特性和反应谱形状随震中距的变化特征。
关键词 汶川地震;基岩地震波;加速度峰值;频谱特性;反应谱

Characteristics Analysis for Rock Site
Ground Motion in Wenchuan Earthquake

LOU Menglin, YANG Yan

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract According to the seismic records of 44 observation stations at rock field during Wenchuan Earthquake, the variance characteristics of the peak value, component frequencies and shape of response spectrum of the accelerations recorded at rock site with epicentral distance are analyzed.
Key words Wenchuan Earthquake; seismic wave at rock site; acceleration peak; frequency characteristics; response spectrum

地震动参数是随着震源特性、传播的中间介质和覆盖层特性而变化的地面运动统计特征,随机性很强^[1]。由于长周期观测资料较少,获得具有普适性的长周期反应谱衰减关系就更为困难。与地表波记录相比,基岩地震动的影响因素则相对简单,目前主要考虑震级大小和震中距。基岩地震动是评价场地地震效应和重要工程设计地震动的基本依据,本文利用汶川地震主震的基岩地震动记录数据,分析震中距对基岩地震动频谱特性的影响,并以上海软土地场为例,进一步讨论软土放大效应对远场基岩波的影响。

1 汶川地震基岩地震动记录

1.1 基岩台站信息整理

汶川地震中,国家数字强震动台网中 19 个省市共 420 个台站获得了震相完整的强震动加速度记录,极大地丰富了我国强震动观测数据库。共有 44 个台站获得了主震的基岩自由地表地震动记录,台站分布及地震动三分量峰值等基本信息见表 1(四川自贡地形影响台阵共有 7 条记录,本文选择了峰值加速度较大的 2 条)。其中,距震中最近的是四川郫县台(51PXZ),震中距为 32 km;最远的是上海佘山台(31SSE),震中距为 1 689 km;水平分量最大峰值加速度为 306.571 cm/s²,在四川茂县台(51MXT)获得。

表 1 基岩台站与地震动基本信息

省份	编号	台站名称及代码	台站经纬度		加速度 计型号	记录长 度/s	震中 距/km	峰值加速度/(cm·s ⁻²)		
			经度	纬度				东西	南北	垂直
四川	1	郫县走石(51PXZ)	103.8	30.9	SLJ-100	121	32	120.511	142.200	99.119
	2	新津梨花(51XJL)	103.8	30.4	SLJ-100	352	68	107.630 8	89.126	-47.968
	3	成都中和(51CDZ)	104.1	30.6	SLJ-100	242	71	-79.801	69.720	-45.329
	4	宝兴民治(51BXZ)	102.9	30.5	SLJ-100	300	73	153.251	-117.085	109.241

续 表

省份	编号	台站名称及代码	台站经纬度		加速度计型号	记录长度/s	震中距/km	峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)		
			经度	纬度				东西	南北	垂直
	5	茂县地办(51MXT)	103.9	31.7	ES-T	296	94	-306.570 7	302.163	-266.640 1
	6	松潘(51SPT)	103.6	32.6	SLJ-100	213	185	-40.148	29.785	24.387
	7	自贡地形影响台阵#7(514ZG)	104.7	29.3	ES-T	220	217	-39.299	45.489	-16.049
	8	自贡地形影响台阵#2(514ZG)	104.8	29.3	ES-T	216	223	-28.078	29.952	15.953
	9	宜宾永兴(51YBY)	104.6	29	ES-T	284	242	-36.795	32.121	15.803
	10	富顺板桥(51FSB)	104.8	29.1	SLJ-100	276	241	-32.064	-24.732	-12.788
	11	长宁(51CNT)	104.9	28.6	SLJ-100	249	295	-18.602	14.200	-8.414
	12	筠连(51JLD)	104.5	28.2	SLJ-100	225	321	-9.718	18.129	6.720
	13	西昌小庙(51XCX)	102.2	27.9	SLJ-100	137	360	5.753	-4.127	3.206
云南	14	永善(53YSX)	103.6	28.2	SLJ-100	198	305	16.262	-15.631	9.657
	15	普洱镇(53YPE)	104.2	28.2	SLJ-100	181	313	-11.657	-12.172	-8.665
	16	大关(53DGX)	103.9	27.7	SLJ-100	123	363	5.722	-7.340	-8.043
甘肃	17	文县(62WIX)	104.5	33	SLJ-100	158	249	-142.691	-141.157	-131.973
	18	舟曲(62ZHQ)	104.4	33.8	SLJ-100	123	330	-32.504	-37.862	22.652
	19	临潭(62LTA)	103.4	34.7	SLJ-100	93	418	-7.438	10.24	6.603
	20	静宁(62JNI)	105.8	35.5	SLJ-100	70	551	-14.923	-9.548	13.011
陕西	21	汤峪(61TAY)	107.9	34.1	ES-T	544	544	-19.082	-29.43	26.837
	22	长安(61CHA)	108.9	34	ES-T	613	613	17.322	-19.611	-13.722
湖北	23	恩施(42ESH)	109.5	30.3	SLJ-100	81	581	-7.990	-7.298	-5.278
青海	24	乐都(63LED)	102.4	36.6	SLJ-100	377	637	2.083	-2.430	2.079
	25	德令哈(63DLH)	97.4	37.4	SLJ-100	252	910	0.439	0.875	-0.441
宁夏	26	牛首山(64NSS)	106.1	37.4	SLJ-100	41	758	-4.462	-5.335	-3.619
	27	小口子(64XKZ)	105.9	38.6	SLJ-100	40	880	4.740	2.848	-2.829
	28	汝箕沟(64RJG)	106.1	39	SLJ-100	81	928	-3.767	-2.896	-3.003
	29	正谊(64ZYG)	106.4	39.2	SLJ-100	82	956	4.511	2.293	1.651
内蒙	30	包头(15BTT)	110	40.6	SLJ-100	41	1 225	-1.984	-1.863	-1.342
安徽	31	六安(34LUA)	116.5	31.7	SLJ-100	350	1 241	-2.032	—	—
江苏	32	南京(32NNJ)	118.9	32.1	SLJ-100	66	1 468	1.199	0.655	-0.822
	33	高淳(32NGC)	119.0	31.4	SLJ-100	108	1 478	0.771	-1.441	-1.010
北京	34	沿城河山庄(11YHC)	115.7	40.1	SLJ-100	70	1 504	1.093	1.719	1.047
广东	35	新圩(44XIX)	114.3	22.9	SLJ-100	212	1 397	-0.667	0.804	-0.829
福建	36	长汀(35CTT)	116.4	25.8	SLJ-100	600	1 388	—	0.854	-0.769
	37	东山(35DST)	117.4	23.7	SLJ-100	500	1 594	-0.503	-0.619	0.688
	38	泉州(35QZT)	118.6	24.9	SLJ-100	500	1 631	0.514	-0.524	-0.652
上海	39	佘山(31SSE)	121.19	31.1	ES-T	500	1 689	-0.915	-1.122	1.146

1.2 基岩场地加速度峰值衰减规律

图 1 为汶川地震基岩场地峰值加速度随断层距的变化情况。地震发生后,于海英等学者统计分析了中国 420 个台站的强震动记录,得到汶川地震自由场地加速度峰值衰减规律^[2]。衰减方程式如下:

lg(PGA) = a + blg(D_{rup} + c) (1)

式中 PGA——峰值加速度,cm · s⁻²;
D_{rup}——断层距,定义为场地至断层破裂面的最短距离,km。

衰减曲线与回归参数详见图 1 中的“自由场衰减曲线”及表 2 中的“自由场地”一栏数据。

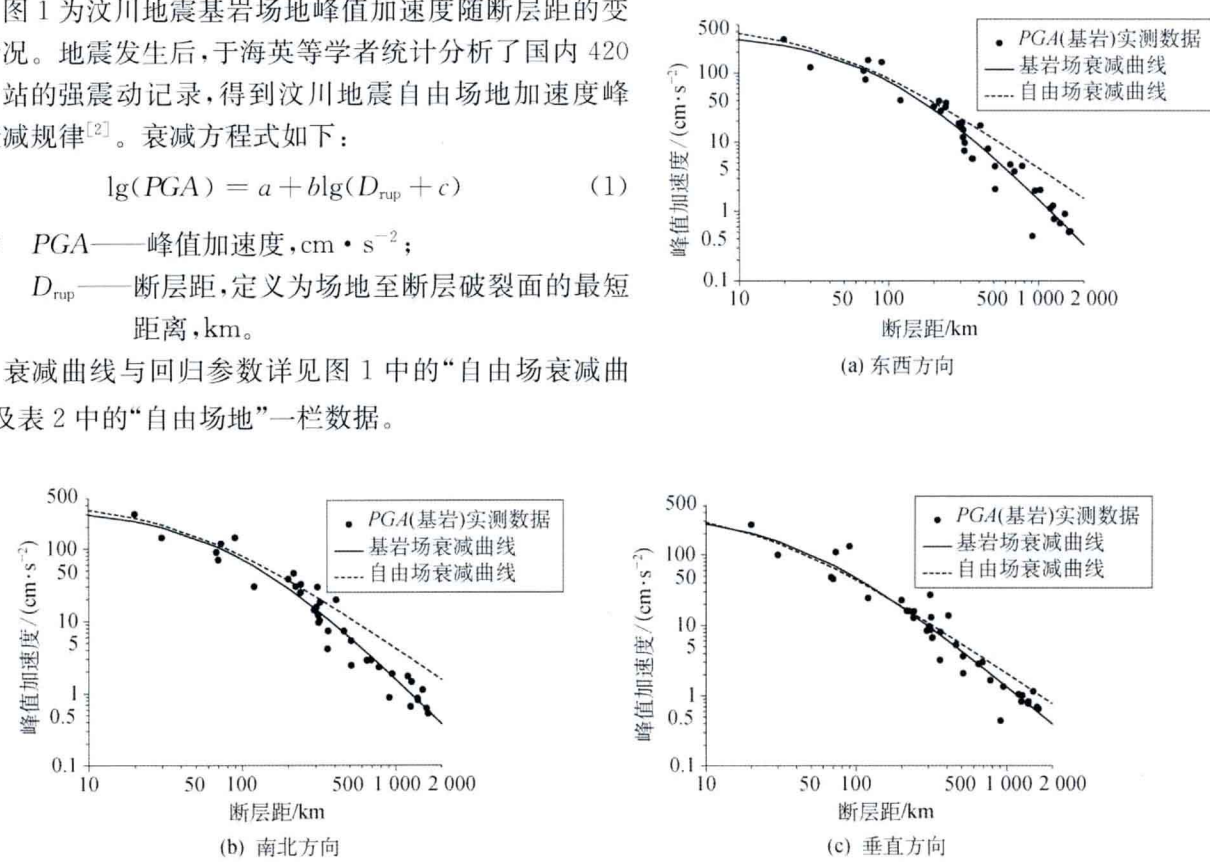


图 1 峰值加速度随断层距变化的衰减关系

表 2		回归参数		
场 地 类 型	地震动三分量	a	b	c
自由场地(包括基岩、土层场地)	东西方向	5.12	-1.49	41.10
	南北方向	5.09	-1.48	43.05
	垂直方向	4.65	-1.44	23.26
基岩场地	东西方向	7.11	-2.29	95.96
	南北方向	6.79	-2.17	87.33
	垂直方向	5.54	-1.79	43.34

对比发现,于海英等给出的衰减规律与基岩场的数据吻合性较差,分析原因如下:

(1) 统计结果基于 420 条地震动记录数据,离散性大;而基岩场地记录只有 39 个,数据记录较少,离散性相对较小。

(2) 统计数据中同时包含土层场地与基岩场地的地震动记录,但是衰减方程式(1)中并未考虑场地差异。然而同一地区,土层加速度峰值一般要比基岩场地大;特别是远场记录中,基岩峰值越小,土层的放大效应越明显,土层记录和基岩记录的偏差越大。

(3) 基岩记录中,近场数据相对较少,远场数据较多且峰值较小。断层距超过500 km时,峰值一般仅为几个 gal(1 gal=10⁻² m · s⁻²),对于参数调整更为敏感。基于以上原因,对于基岩场地,有必要单独进行研究。

本文基于 39 条基岩记录的加速度峰值,重新拟合计算后,得到汶川地震中基岩地震加速度峰值点额衰减关系,衰减曲线与回归参数详见图 1 中的“基岩场衰减曲线”及表 2 中的“基岩场地”记录。

2 频谱特性随震中距的变化规律

2.1 不同震中距典型基岩台站记录对比

为了直观说明地震波的传递与衰减,从表1中选取了五个典型台站:四川郫县台(51PXZ)、湖北恩施台(42ESH)、安徽六安台(34LUA)、江苏高淳台(32NGC)和上海佘山台(31SSE)。这五个台站基本处于同一纬度($30.3^{\circ}\text{N}\sim 31.7^{\circ}\text{N}$),震中距从32 km增至1 689 km,具体位置分布如图2所示。选择每个台站记录的东西分量为研究对象,地震波时程曲线一并列于图2中。

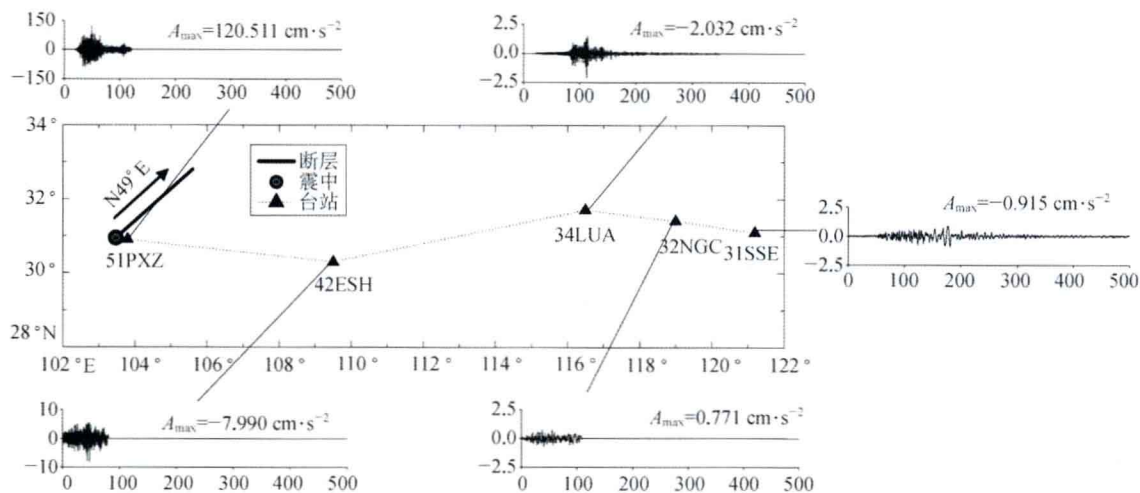


图2 典型基岩台站分布与时程记录

这些典型台站基岩记录的傅里叶幅值谱图和标准反应谱图分别如图3、图4所示。图3的傅里叶谱清晰反映了随距离增大,高频分量逐渐衰减的过程。从图4的标准反应谱则可以看出:

- (1) 随震中距增大,放大系数最大值 $\beta_{\max}$ 出现的周期逐渐右移。
- (2) 除高淳台(32NGC)外, $\beta_{\max}$ 也随震中距增大而增大。
- (3) β 曲线从明显的短周期多峰曲线逐渐转为长周期多峰曲线。郫县台(51PXZ)的峰值主要集中在1 s以内;高淳台(32NGC)除了1.96 s时出现的 $\beta_{\max}$,在3.63 s和5.97 s处仍有较大峰值出现;佘山台(31SSE) $\beta_{\max}$ 对应的周期为7.64 s,且在12 s附近仍有一个较大的峰值。

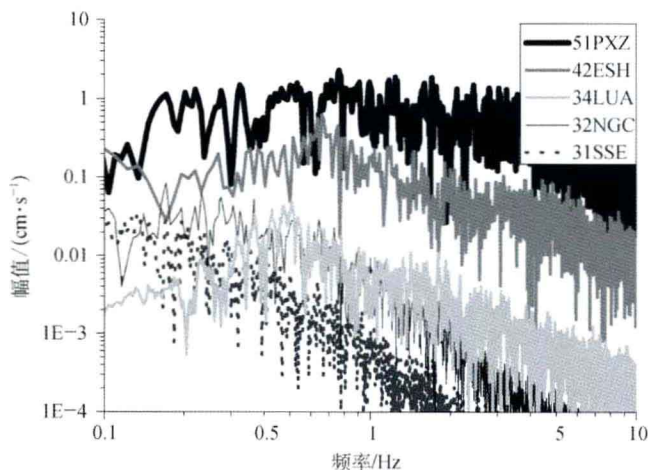


图3 傅里叶幅值谱

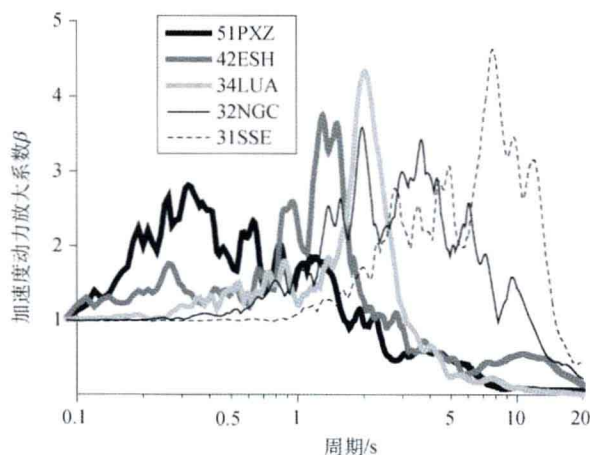


图4 标准反应谱(阻尼比0.05)