

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.03.005



# 基于单台强震数据软厚场地地震反应 不确定性分析

陈龙伟,冯浩,袁晓铭

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

**摘要:**选取新西兰 Canterbury 地区 12 个强震台站及 2010—2012 年间的台站 584 条记录,以浅硬场地 LPCC 作为参考台站,系统分析 Christchurch 市区软厚场地地震效应(即场地放大函数)的不确定性及其地震动强度、震级、震源距及震源方位角等因素对场地放大函数不确定性的影响规律。分析结果发现:1)地震动强度水平对场地放大函数均值影响较小,仅在长周期(如大于 1.0 s)段趋于增大场地的放大效应;以不同地震动强度值进行分组,地震动强度大于  $0.6 \text{ m/s}^2$  的分组场地放大函数标准差显著高于地震动强度小于  $0.6 \text{ m/s}^2$  分组,特别是地震动强度大于  $1.0 \text{ m/s}^2$  时场地放大函数标准差最大,反映了场地土层非线性提高场地地震效应的不确定性;2)地震震级对场地放大函数不确定性影响小,不同地震震级分组场地放大函数均值及标准差的表现基本相当;3)震源距是场地地震反应不确定性的一个重要因素,震源距小于 5 km 时场地放大函数的标准差明显大于其它情况,即震源距越小地震反应不确定性越大;4)场地放大函数不确定性与震源方位角的选取基本无关,即选取不同的震源方位角场地放大函数标准差无明显差别。

**关键词:**不确定性;软厚场地;新西兰地震;场地放大函数

**中图分类号:**TU435;P315.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2015)03-0035-07

## Variability analysis of deep-soft site response using single-station strong-motion records

Chen Longwei, Feng Hao, Yuan Xiaoming

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration; Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin 150080, P. R. China)

**Abstract:** 12 strong-motion stations are selected and based on 584 seismic records recorded during the 2010-2012 Canterbury earthquake sequences, New Zealand, a systematic variability analysis of the deep-soft site response (SAF, *i. e.*, site amplification function) in Christchurch city area is conducted with a reference outcropping station LPCC. Thereafter, influence factors including ground motion intensity roughly measured by PGA, magnitude  $M_w$ , hypocentral distance  $R_{\text{hypo}}$  and azimuths on the variability of SAF are analyzed. The results show that: 1) ground motion intensity PGA has weak effect on mean  $\lg(\text{SAF})$  values except that PGA tends to strengthen amplification

**收稿日期:**2014-12-26

**基金项目:**黑龙江省自然科学基金(LC2013C14)

**作者简介:**陈龙伟(1983-),男,博士,副研究员,主要从事岩土地震工程、土动力学、工程地震研究,(E-mail)chenlongwei83@126.com。

**Received:**2014-12-26

**Foundation item:** Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (No. LC2013C14)

**Author brief:** Chen Longwei (1983-), PhD, associate research fellow, main research interests: geotechnical earthquake engineering, engineering seismology, (E-mail) chenlongwei83@126.com.

effect for long period components; while under different PGA subdividing bins, the standard deviations of  $\lg(\text{SAF})$  for bins with PGA greater than  $0.6\text{m/s}^2$  are considerably larger than those for PGA less than  $0.6\text{m/s}^2$  bins, indicating possible subsoil non-linearity tends to increase the site response variability; 2) seismic magnitude shows little influence on the variability of site response and the means and standard deviations of  $\log_{10}(\text{SAF})$  for different  $M_w$  dividing bins demonstrate similar patterns; 3) hypocentral distance is another important influence factor on site response variability, that is, the variability of SAF with  $R_{\text{hypo}}$  less than  $5\text{km}$  is larger than that with  $R_{\text{hypo}}$  were larger than  $5\text{km}$ ; 4) the variability of SAF is basically independent of source azimuths to stations which means the uncertainty of SAF remains closely similar in different azimuth bins.

**Key words:** variability; deep-soft site; New Zealand earthquake sequences; site amplification function

场地地震反应分析是地震安全评价的关键环节,目前主要采用的等效线性化程序,如 Shake2000 及 LSSRLI-1 程序,进行场地地震反应数值计算,计算结果的可靠性难以得到实际地震数据的检验,且存在很大的不确定性。实际上,同一场地在不同地震中的反应亦不同,体现在地震动幅值、频率成分的差异,这种差异主要源于震源机制、地震波传播路径以及场地土层动力特性的差异。准确评价场地地震反应的不确定性,可用于验证现有场地地震反应分析结果的合理性。通过单台地震数据探讨场地反应不确定性及其影响因素,可以弥补数值结果可靠性的不足。但是,以往相关研究受到了单台强震记录缺乏这一客观条件的限制,进而采用数值实验手段。随着全球地震台网建设的加强,在地震活动性较为频繁的地区可以获取较为丰富的单台地震数据。通过单台地震数据研究场地反应是目前研究的热门课题<sup>[1-4]</sup>。

地震中软厚场地响应不同于其它类别场地,体现在对地震动长周期成分的放大作用。中国的建筑物抗震设计规范中明确规定对于软弱土、可液化场地抗震设计要进行专门研究,抗震设计时需采取相应措施<sup>[5]</sup>。软厚场地地基设计的关键问题之一就是地震动强度估计,现有场地反应分析程序在计算软厚场地地震反应时基本失效,或者计算结果差异性很大。原因主要包括:场地基岩深度空间分布不均匀,即场地土层厚度分布空间不均,目前,虽然有较成熟面波测试法以及先进的地震测试设备,但是软厚场地基岩面的确定仍然存在很大误差<sup>[6]</sup>,这种误差可能导致地震动强度估计误差及规范中抗震设计谱中地震影响系数估计误差。第二,对于软厚场地尚无恰当特征参数能够描述其地震反应,已有研究结果显示场地特征参数都不能作为一般参数,用于描述软厚场地地震反应的不确定性<sup>[7-8]</sup>。第三,中、强地震中软厚场地土层表现出明显的非线性特征,对于饱和砂土场地甚至会液化,所以,在选取场地模型描述土的粘弹性及耗能特

性进行非线性分析时会产生很大的误差,势必导致分析结果的不确定性<sup>[9]</sup>。对软厚场地地震反应不确定性分析最有效的方法就是采用实际地震数据,随着单个地震台记录的累积,采用单台地震记录研究场地反应的不确定性。

通过单台地震记录研究场地反应的不确定性,首先需要选择恰当的场地参数。笔者采用场地放大函数(Site Amplification Function, SAF),场地放大函数综合反应了地震场地效应,是衡量场地反应的综合指标。克服以往研究缺少实测地震数据验证的限制,特别是软厚场地地震记录,选取新西兰 Canterbury 平原地区软厚场地台站记录,以及作为参考台站的 B 类场地 LPCC 和作为对比分析的 C 类场地 HVSC。通过实测地震数据分析软厚场地地震反应不确定性,同时剖析地震反应不确定性的影响因素(即地震动强度 PGA、震级、震源距、震源方位角)及影响规律。

## 1 地震数据及场地地震反应

### 1.1 地震台站及强震数据的选取

Christchurch 市位于 Canterbury 平原地区,为多条源于南 Alps 山脉的河流冲积而成的冲积扇形平原。Christchurch 市坐落在 Waimakiriri 古河道上,Avon 和 Heathcote 两条河流穿城而过。附近地区地质构造复杂,地层主要由中间夹杂淤泥、黏土、泥炭、贝壳砂等的一系列卵石层组成,勘察结果显示 Christchurch 地区的卵石层厚度多超过  $500\text{m}$ ,甚至超过  $2\text{km}$ <sup>[10]</sup>。Christchurch 市地区多为可液化的软弱土层,2011 年 Christchurch  $M_w 6.3$  地震中市区发生严重砂土液化,是自有液化调查历史以来以液化震害为主要震害的一次地震,直接导致部分城区的废弃<sup>[11]</sup>。

新西兰拥有世界上较为完备的地震台网(GetNet),拥有 100 多地震仪和 180 多个强震台站,

在地震中可以获得高质量的地震数字记录。在 2010—2012 年 Canterbury 地区一系列地震及余震中,GetNet 获得了丰富的地震数据,为地震研究提供了必要的宝贵资源。

选取 Christchurch 地区 12 个强震台站(图 1),台站主要位于 Christchurch 市区软弱场地(主要是 D、E 类场地),搜集台站 2010—2012 年系列强震记录 584 条,地震震级  $M_w$  4.0~7.1,震源距 100 km 以内。图 2 显示选取台站记录的  $M_w$  与震源距的分布图。根据新西兰抗震设计规范 NZS1170.5(2004),Christchurch 地区多为 D 类场地,然而 Wood 等人根据现场实测剪切波速数据及场地土层厚度对 Christchurch 市区台站场地类别进行修正,修正结果多为 E 类场地<sup>[12]</sup>。表 1 列出选取台站场地信息,图 3 给出台站场地的剪切波速剖面。剪切波速剖面显示,Christchurch 市区覆盖厚度超过 20 m 的软弱土层,即软厚场地。

表 1 新西兰台站信息<sup>[12]</sup>

Table 1 Information for strong motion stations in Christchurch<sup>[12]</sup>

台站	$v_{s30}/$ ( $m \cdot s^{-1}$ )	$T_n/s$	场地类别 (NZS1170.5)	修正场 地类别	记录数
CBGS	187	0.45	D	E	43
CCCC	198	0.71	D	E	48
CHHC	194	0.53	D	E	58
CMHS	204	0.72	D	E	37
HPSC	206	0.45	E	D/E	49
HVSC	422	0.42	C	C	55
LPCC	792	0.16	B	C	52
NNBS	211	0.73	E	E	42
PRPC	206	0.83	E	E	45
REHS	141	0.65	D	E	44
RHSC	293	0.35	D	C/D	60
SHLC	207	0.54	D	D	51



图 1 选取的 Christchurch 地区强震台站位置

Fig. 1 Locations of selected strong motion stations in Christchurch area

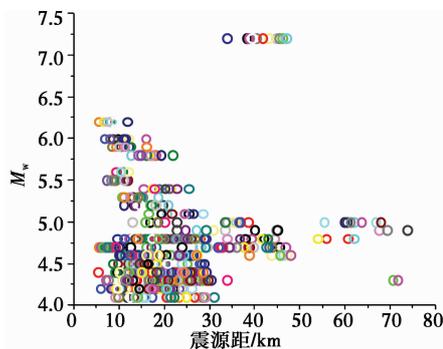


图 2 选取台站地震记录  $M_w$ -震源距分布图

Fig. 2  $M_w$ - $R_{\text{hypo}}$  distribution of selected earthquake data

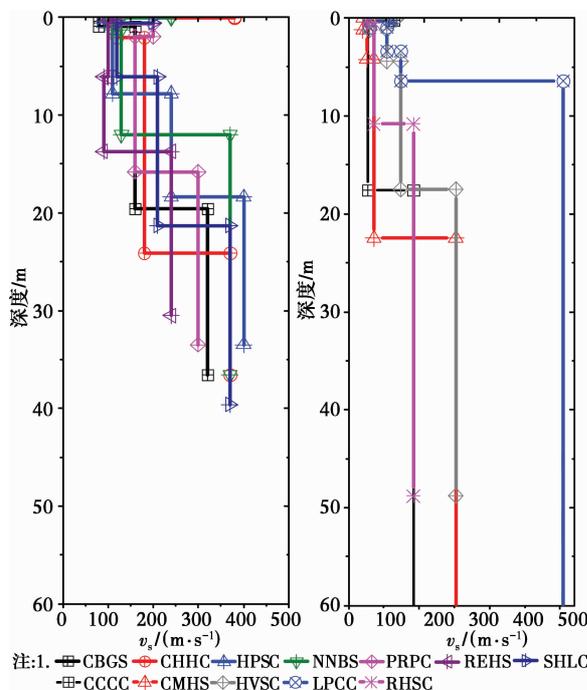


图 3 选取的强震台站剪切波速剖面

Fig. 3 Shear wave velocity profiles of the selected stations

### 1.2 不确定性分析

选取反映场地地震反应指标,即场地地震放大函数(SAF),定义为场地地表加速度反应谱值与基岩输入地震动反应谱的比值。由于新西兰强震台网没有安装井下强震仪,不能直接确定基岩输入。为克服这一难题,选取参考台站 LPCC 为出露基岩输入。台站 LPCC 位于 Christchurch 市东南部 Lyttleton 港口,台站位于 B 类场地,场地为覆盖于火山基岩上的浅薄土层(小于 5 m)。选取参考台站计算传递函数时,场地与参台站地之间的距离相对于其震源距应很小,可以忽略传播路径的影响,否则进行传播路径几何扩散的修正,即反应谱比值乘以震源距的比值近似进行修正<sup>[13]</sup>,计算式如式(1),采用对数值以便于进行分析。

$$\lg(\text{SAF}) = \lg\left(\frac{\text{PSA}^s R_{\text{hypo}}^s}{\text{PSA}^r R_{\text{hypo}}^r}\right) \quad (1)$$

式中:  $\text{PSA}^s$ 、 $R_{\text{hypo}}^s$  为目标台站加速度谱值及台站地震源距,  $\text{PSA}^r$ 、 $R_{\text{hypo}}^r$  为参考台站加速度谱值及台站地震源距。

基于式(1),图 4 给出选取台站记录计算得到的  $\lg(\text{SAF})$  曲线。由于选取的地震震级主要集中在 4.0~4.8,且长周期信号噪音干扰影响较大,避免噪音影响,选取周期选取 0~3.0 s,涵盖了工程结构普遍的周期范围。

由图 4 可以得到:1)周期 0~0.2 s,除 CMHS、HVSC 及 PRPC 台站,其余台站  $\lg(\text{SAF})$  均值小于 0,即这些场地相对于参考 LPPC 对地震动具有减震效应;2)周期 0.2~0.4 s,  $\lg(\text{SAF})$  均值随着周期的增大而增大,且均大于 0,即场地相对于参考 LPPC 对地震动具有放大效应;3)周期大于 0.4 s, C 类场地台站 HVSC,相对较硬,剪切波速  $v_{s30}$  为 422 m/s,  $\lg(\text{SAF})$  均值最小,且随着周期的增大趋于减小,即硬土层对地震动中长周期的放大效应较弱;剪切波速最小的台站 REHS,  $v_{s30}$  为 141 m/s,  $\lg(\text{SAF})$  均值最大,说明软弱土层对地震动长周期放大效应明显,但随着周期增大趋于降低;其余位于市区台站的  $\lg(\text{SAF})$  均值基本相当,且随着周期的增长保持稳定,这些台站中, RHSC 场地剪切波速  $v_{s30}$  为 293 m/s, 场地相对较硬,  $\lg(\text{SAF})$  均值在长周期段相对小于其他台站的  $\lg(\text{SAF})$  均值。

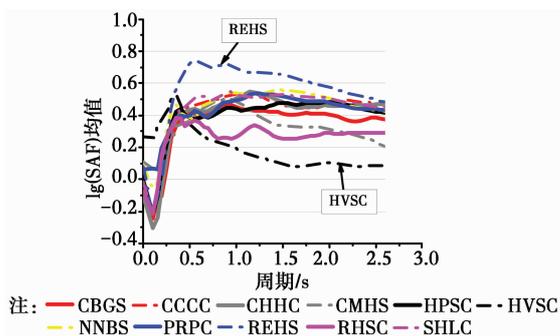


图 4 台站场地  $\lg(\text{SAF})$  均值

Fig. 4 Means  $\lg(\text{SAF})$  for selected stations

图 5 给出所选台站基于地震记录的  $\lg(\text{SAF})$  标准差随着周期的变化曲线。可以看出,  $\lg(\text{SAF})$  标准差随着周期的增长趋于降低。而较硬场地 HVSC 的  $\lg(\text{SAF})$  标准差最小,而对于软弱场地 D 和 E 类场地,  $\lg(\text{SAF})$  标准差基本相当。图 6 分别给出 C、D 和 E 类场地  $\lg(\text{SAF})$  均值和标准差均值。软厚 D 和 E 类场地的场地放大函数较为接近与 C 类场地, HVSC 有明显区别;而 E 类场地离散性比 D 类场地小,比 C 类场地大。原因可能是 D 类场地空间分布

较为分散,而 E 类场地则集中在市区东部近海地区。需要说明的是 C、D 和 E 类场地是指没有进行修正的场地类别,即表 1 中的第 4 列。

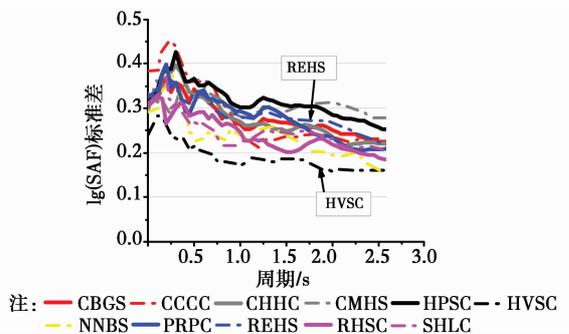


图 5 台站场地  $\lg(\text{SAF})$  标准差

Fig. 5 Standard deviations of  $\lg(\text{SAF})$  for selected stations

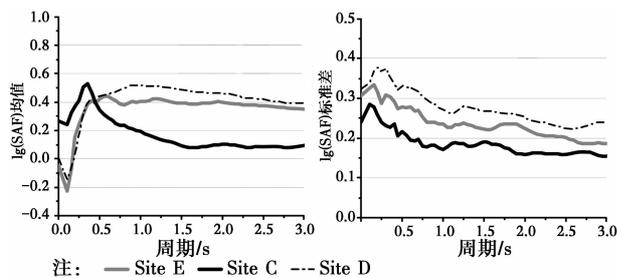


图 6 不同类别场地  $\lg(\text{SAF})$  均值(左)和标准差(右)

Fig. 6 Means (left) and standard deviations (right) of  $\lg(\text{SAF})$  for different site classes

## 2 不确定性影响因素分析

LPPC 作为参照场地,那么仅剩 HVSC 为 C 类场地,记录数量有限。由图 3 的剪切波速剖面可见,位于 Christchurch 市区的 D 与 E 类场地均是厚度超过 20 m 软厚场地,剪切波速 140~300 m/s,多数 200 m/s 左右。通过上一节分析, D 和 E 类场地对地震动响应较为接近(图 4 和图 5),所以市区的 D 和 E 类场地记录统一分析,即 CBGS、CCCC、CHHC、CMHS、HPSC、NNBS、PRPC、REHS、RHSC 和 SHLC 台站记录编为统一数据库,计 356 条地震记录,进行场地地震响应不确定性影响因素分析。

### 2.1 地震动强度 (PGA)

首先,考虑地震动强度与场地 SAF 不确定性的关联性。根据地表加速度 PGA 值,将记录分为 5 组,即  $\text{PGA} \leq 0.2 \text{ m/s}^2$ 、 $0.2 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} \leq 0.4 \text{ m/s}^2$ 、 $0.4 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} \leq 0.6 \text{ m/s}^2$ 、 $0.6 \text{ m/s}^2 < \text{PGA} \leq 1.0 \text{ m/s}^2$  和  $1.0 \text{ m/s}^2 < \text{PGA}$ ,同时,保证每组拥有足够多的地震记录。图 7 给出每个分组的  $\lg(\text{SAF})$  曲线,图 8 给出每个分组  $\lg(\text{SAF})$  均值及标准差曲线。PGA 水平不同,  $\lg(\text{SAF})$  均值基本一致;仅在周期大于 1.0 s 时,  $\lg(\text{SAF})$  均值差异明显,而且 PGA 越大  $\lg(\text{SAF})$  均值

越大,即说明周期大于 1.0 s 时地震动强度越大,场地对地震动放大效应越大。对于  $\lg(\text{SAF})$  标准差而言,随着周期的增大,每个分组的  $\lg(\text{SAF})$  标准差均趋于降低。在 PGA 大于  $0.6 \text{ m/s}^2$  的 2 个分组,  $\lg(\text{SAF})$  标准差差别不大,但显著大于其他分组;在 PGA 小于  $0.6 \text{ m/s}^2$  的 3 个分组,  $\lg(\text{SAF})$  标准差较为接近。

通过分析可知,场地地震动强度,虽仅选择

PGA 作为地震动强度指标,对场地的放大函数  $\lg(\text{SAF})$  均值影响很小,仅在长周期阶段有增大放大函数的趋势;而地震动强度对场地放大函数不确定性影响明显,当地震动强度大于一定数值时显著增大放大函数的不确定性。原因可能与场地土层强震下非线性有关,即场地土非线性提高了场地对地震动放大效应的不确定性。

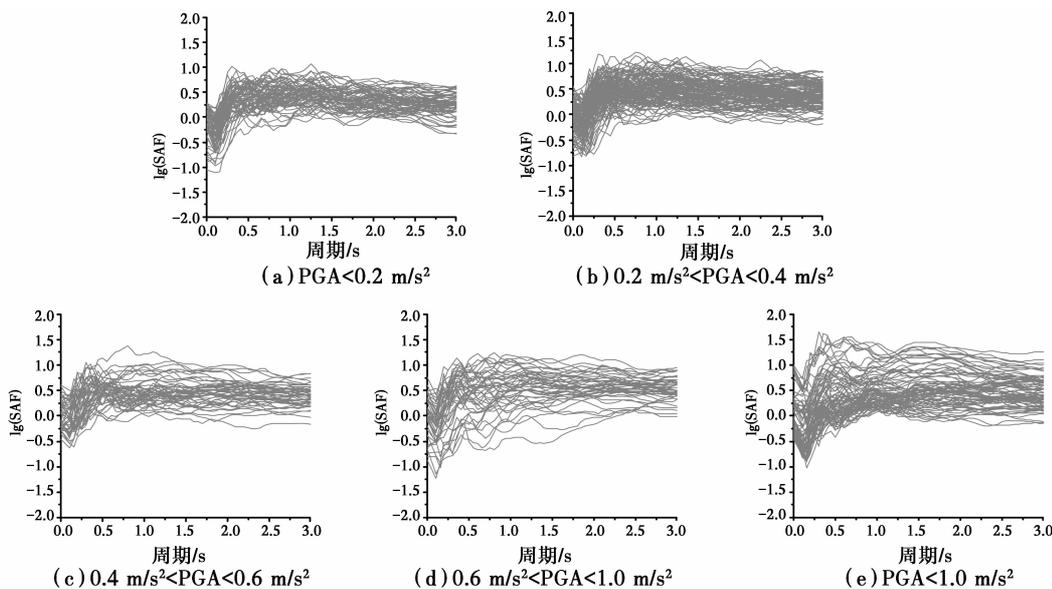


图 7 不同地震动强度分组下场地放大函数  $\lg(\text{SAF})$  曲线

Fig. 7  $\lg(\text{SAF})$  curves with respect to ground shaking intensity PGA bins

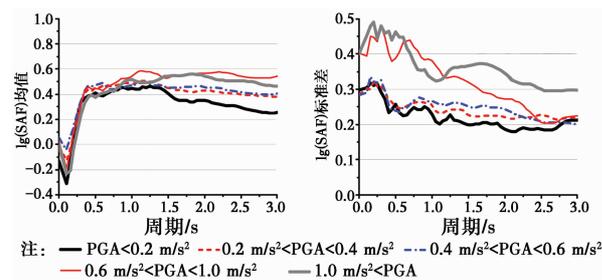


图 8 不同地震动强度分组下场地放大函数均值及标准差

Fig. 8 Means and standard deviations of  $\lg(\text{SAF})$  with respect to ground shaking intensity PGA bins

## 2.2 地震震级 ( $M_w$ )

2010—2012 年新西兰一系列地震中,特别是 2010 年 9 月 4 日 ( $M_w 7.2$ )、2011 年 2 月 22 日 ( $M_w 6.2$ )、2012 年 6 月 14 日 ( $M_w 6.0$ ),新西兰南岛 Canterbury 地区遭遇了严重破坏。同时,此系列地震中也为地震研究提供宝贵的数据资源。所搜集的地震数据中  $M_w > 4.0$  的地震 73 次。分析场地地震动放大函数不确定性与地震震级的关联性,同时,平衡每个分组中数据量,将地震数据根据震级  $M_w$  进行分组,即  $4.0 \leq M_w \leq 4.4$ 、 $4.5 \leq M_w \leq 4.9$  和  $5.0 \leq M_w \leq 7.2$ 。

图 9 显示不同地震震级分组下场地的放大函数

$\lg(\text{SAF})$  曲线。图 10 给出不同地震震级分组放大函数  $\lg(\text{SAF})$  均值及标准差。由图得到,地震震级越大,场地  $\lg(\text{SAF})$  均值趋向减小,但变化范围不大;  $\lg(\text{SAF})$  的标准差基本相当,且与地震震级无关。

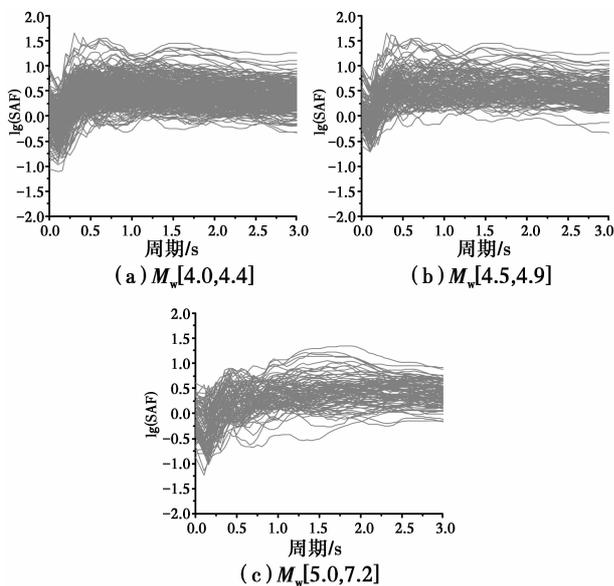


图 9 不同地震震级分组下场地放大函数  $\lg(\text{SAF})$  曲线

Fig. 9  $\lg(\text{SAF})$  curves with respect to earthquake magnitude bins

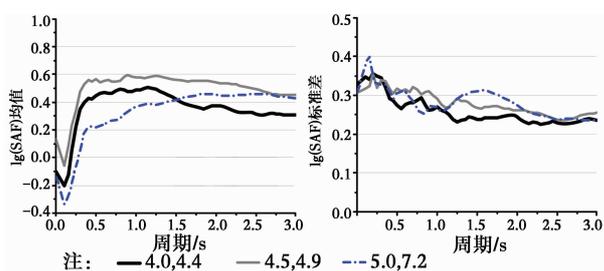


图 10 不同地震震级分组下场地放大函数均值及标准差

Fig. 10 Means and standard deviations of  $\lg$  (SAF) with respect to earthquake magnitude bins

### 2.3 地震震源距

将搜集的地震记录按照震源距  $R_{\text{hypo}}$  进行分组, 即  $5 \text{ km} < R_{\text{hypo}} \leq 15 \text{ km}$ 、 $15 \text{ km} < R_{\text{hypo}} \leq 25 \text{ km}$  和  $25 \text{ km} < R_{\text{hypo}}$ 。

图 11 显示不同震源距分组下, 场地放大函数  $\lg(\text{SAF})$  曲线。图 12 给出  $\lg(\text{SAF})$  均值及标准差。可知, 当频率小于  $0.3 \text{ s}$  时,  $\lg(\text{SAF})$  与距离无关; 而当周期大于  $0.3 \text{ s}$  时, 震源距越大  $\lg(\text{SAF})$  越小, 但是不同震源距分组  $\lg(\text{SAF})$  差别不显著。对于

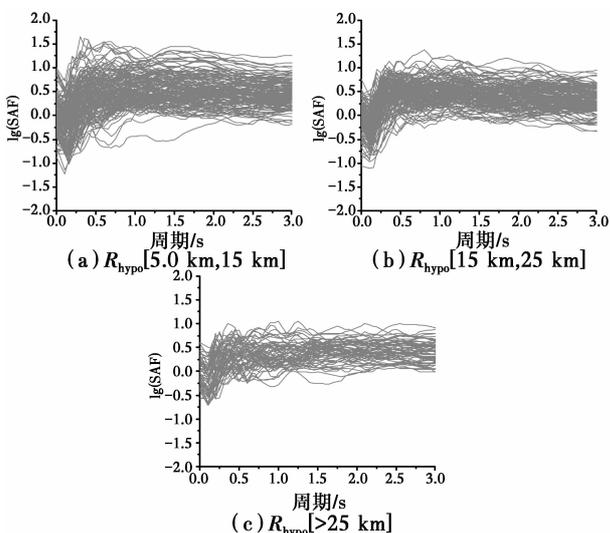


图 11 不同地震震源距分组下场地放大函数  $\lg(\text{SAF})$  曲线

Fig. 11  $\lg(\text{SAF})$  curves with respect to hypocentral distance bins

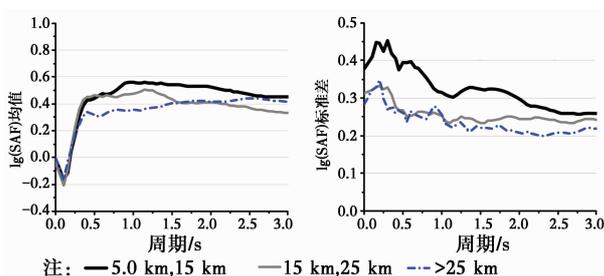


图 12 不同地震震源距分组下场地放大函数均值及标准差

Fig. 12 Means and standard deviations of  $\lg$  (SAF) with respect to hypocentral distance bins

$\lg(\text{SAF})$  标准差而言,  $5 \text{ km} < R_{\text{hypo}} \leq 15 \text{ km}$  分组的标准差明显大于其它 2 个分组, 而且其它 2 个分组  $\lg(\text{SAF})$  标准差基本重合。所以, 距离震源较近区域场地放大函数的不确定性明显大于距离震源较远的区域, 而且震源距超过一定数值的场地, 其放大函数的不确定性与距离基本无关。

### 2.4 震源方位角

震源方位角是影响场地地震反应不确定性的另一因素, 其体现了地震波传播路径以及不同震源区对场地放大函数不确定性的影响。采用的地震数据的震源与台站的方位角主要分布在  $0 \sim 220^\circ$  范围内, 所以按照  $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $120^\circ$  震源方位角进行分组。同一方位角分组中, 场地  $\lg(\text{SAF})$  标准差取平均值。这样得到的不同震源方位角分组下, 场地  $\lg(\text{SAF})$  标准差(图 13)以及给定周期下  $\lg(\text{SAF})$  标准差随着方位角的变化规律(图 14)。由图 13 可以看出, 不同震源方位角分组场地  $\lg(\text{SAF})$  标准差基本接近, 即场地放大函数不确定性与震源方位角选取基本无关。另一方面, 给定周期条件下, 图 14 直观显示场地  $\lg(\text{SAF})$  标准差存在随着方位角的增长的趋势, 但其增长幅值甚微, 基本保持稳定。

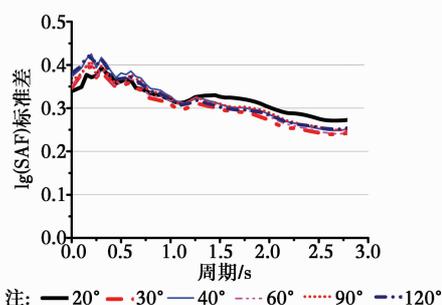


图 13 不同震源方位角分组场地放大函数  $\lg(\text{SAF})$  标准差

Fig. 13 Standard deviations of  $\lg(\text{SAF})$  with respect to azimuth bins

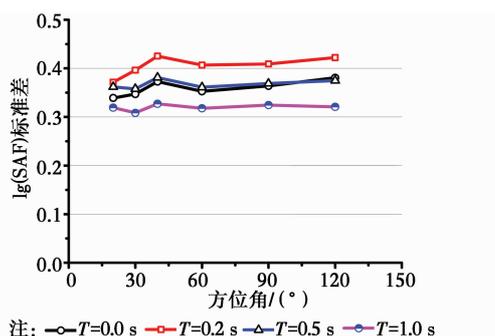


图 14 给定周期下震源方位角对  $\lg(\text{SAF})$  标准差的影响

Fig. 14 Standard deviations of  $\lg(\text{SAF})$  to azimuth under different periods

### 3 结 论

选取新西兰 Christchurch 市区 12 个强震台站 2010—2012 年间的台站记录 584 条,以浅硬场地 LPCC 作为参考输入场地,对比分析选取场地的场地放大函数的不确定性。结果发现,较硬 C 类场地放大函数的不确定性最小。为探究场地放大函数不确定性源因,克服地震记录数据量上的限制将 Christchurch 市区软厚 D 类和 E 类场地台站作统一分析,分析了地震动强度 PGA、地震震级  $M_w$  及震源距  $R_{\text{hypo}}$  以及震源方位角等因素对场地不确定性的影响,分析结果发现:1)地震动强度水平对场地放大函数均值影响较小,仅在周期大于 1.0 s 段有差别,但场地放大函数标准差在 PGA 大于  $0.6 \text{ m/s}^2$  分组下显著高于 PGA 小于  $0.6 \text{ m/s}^2$  分组;2)不同地震震级下,不同震级分组的场地放大函数标准差表现基本相当,即地震震级对场地放大函数不确定性影响小;3)地震震源距是影响场地放大函数不确定性的一个重要因素,距离震源越近的场地,其放大函数不确定性越高;4)不同震源方位角分组下场地  $\lg(\text{SAF})$  标准差差别很小,即场地放大函数不确定性与震源方位角的选取基本无关。

震源距(近场)、强地震动是场地放大函数不确定性的主要来源,而地震震级以及震源方位角的影响可忽略;另外,场地土层非线性趋于提高场地反应不确定性,其中机理有待深入探讨。

软厚土层场地反应分析的关键是场地放大函数模型的构建以及不确定性评估,采用合适的参数量化场地效应的不确定性是目前研究的重点,也是软厚场地地震反应分析需要解决的问题。

#### 参考文献:

[1] Kokusho T, Sato K. Surface-to-base amplification evaluated from Kik-net vertical array strong motion records [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28:707-716.

[2] Rodriguez-Marek T, Montalva G A, Cotton F, et al. Analysis of single-station standard deviation using the Kik-net data [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101(2): 1242-1258.

[3] Abrahamson N A, Hollenback J C. Application of single-station sigma ground motion prediction equations in practice [C]//Proceedings of the 15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 2012, Lisbon.

[4] Assimaki D, Li W, Steidl J H, et al. Site amplification and attenuation via downhole array seismogram inversion: a comparative study of the 2003 Miyagi-Oki aftershock sequence [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2008, 98(1): 301-330.

[5] GB 50011—2010 建筑物抗震设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

GB 50011—2010 Code for seismic design of building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)

[6] Arai H, Tokimatsu K. S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to vertical (H/V) spectrum [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(5): 1766-1778.

[7] Boore D M, Thompson E M, Cadet H. Regional correlation of Vs30 and velocities averaged over depths less than and greater than 30 m [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 101(6): 3046-3059.

[8] Choi Y, Stewart J P, Graves R W. Empirical model for basin effects accounts for basin depth and source location [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2005, 95(4): 1412-1427.

[9] Bazzurro P, Cornell C A. Ground-motion amplification in nonlinear soil sites with uncertain properties [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2011, 94(6): 2090-2109.

[10] Tonkin & Taylor Ltd. Christchurch central city geological interpretative report (Version 1.1) [R]. Report for Christchurch City Council, Christchurch, New Zealand, 2012.

[11] 陈龙伟,袁晓铭,孙锐. 2011 年新西兰 Mw6.3 地震液化及岩土震害述评 [J]. *世界地震工程*, 2013, 29(3): 1-9.

Chen L W, Yuan X M, Sun R. Review of liquefaction phenomena and geotechnical damage in the 2011 New Zealand Mw6.3 earthquake [J]. *World Earthquake Engineering*, 2013, 29(3): 1-9. (in Chinese)

[12] Wood C M, Cox B R, Wotherspoon L M, et al. Dynamic site characterization of Christchurch strong motion stations [J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 2011, 44(4): 195-204.

[13] Steidl J H, Tumarkin A G, Archuleta R J. What is a reference site? [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86(6): 1733-1748.