

# 基于实际记录的现有等效线性化分析程序对比研究<sup>①</sup>

李晓飞, 孙 锐, 袁晓铭

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

**摘要:**根据我国建筑抗震设计规范中场地的分类原则, 确定日本 KiK-net 中台站的场地类别。运用 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 对不同类别场地的峰值加速度、反应谱、剪应变等进行计算, 给出 I ~ IV 类场地的计算结果, 并将计算结果进行汇总后进行对比分析, 得到不同场地条件下 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 计算结果的差异以及计算结果与实测记录之间的差别。研究表明, 土的动模量比、阻尼比的非线性以及场地类型对计算结果影响较大, I、II 类场地中大多数情况下 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 计算结果相差不大; III、IV 类场地中多数情况下 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 计算结果相差不大。以实测记录为基准, SHAKE2000 结果好于 LSSRLI-1 计算结果, 特别是对于 III、IV 类场地中, 土体为强非线性工况而言, SHAKE2000 结果要明显好于 LSSRLI-1 计算结果。初步分析表明, SHAKE2000 与 LSSRLI-1 计算结果差异来自于计算剪应变的不同。

**关键词:** 土层地震反应分析; LSSRLI-1; SHAKE2000; KiK-net; 强震记录

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)01-0144-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.01.0144

## Comparative Study on Existing Equivalent Linear Analysis Programs Based on KiK-net

LI Xiao-fei, SUN Rui, YUAN Xiao-ming

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

**Abstract:** Referring to the site classification principles in the code for seismic design for buildings, China, site categories for the stations selected from Kik-Net, Japan, were determined. Using the current equivalent linear programs, Shake2000 and LSSRLI-1, for site seismic response analysis, the peak acceleration, response spectra, and shear strain were calculated for different site categories. The calculated results for the different site categories were compared and the calculation discrepancy between Shake2000 and LSSRLI-1 was obtained for the different site categories. In addition, the numerical results were compared to those of real seismic records. The analytical results show that the nonlinearity of the soil dynamic modulus ratio, damping ratio, and site categories have a significant influence on the calculation results. For class I and II sites, the calculated results by Shake2000 and LSSRLI-1 were similar for most cases, while for class III and IV sites, the calculated results by Shake2000 and LSSRLI-1 were similar for the majority of the cases. With respect to real seismic records, the results by SHAKE2000 are better than those by LSSRLI-1, especially for class III and IV sites. For strong nonlinear soil, the results by SHAKE2000 are noticeably better than those by LSSRLI-1. Preliminary analysis indicates that the difference in the calcu-

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国际科技部地震行业专项(201408020-03); 国家自然科学基金(51278472)

作者简介: 李晓飞(1988-), 女, 博士研究生, 主要从事岩土地震工程方面的研究. E-mail: lxf2011iem@126.com

lated results by SHAKE2000 and LSSRLI-1 is due to the difference in the calculated shear strains.

**Key words:** seismic response analysis of soil layer; LSSRLI-1; SHAKE2000; KiK-net; strong motion record

## 0 引言

场地反应分析作为地震工程和土动力学的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>,是工程结构抗震设计的重要内容。如何在场地地震安全性评价中科学、准确地确定工程结构抗震设计中所使用的抗震设计参数是十分重要的问题。在给定的输入地震动下通过土层反应程序计算确定地表地震运动,从而为抗震设计提供设计参数是场地地震安全性评价工作的重要内容,而其中计算方法和程序的可靠性就成为十分重要的问题。

目前国内外一维土层地震反应分析程序有两个代表,一个是 20 世纪八十年代发展起来的,但以后没有进行改进的 LSSRLI-1<sup>[3]</sup>,是我国《工程场地地震安全性评价技术规范》(GB 17741-2005)中推荐使用的土层反应分析程序<sup>[4-5]</sup>;另一个是国外的 SHAKE 系列,其最新的程序为 SHAKE2000<sup>[6]</sup>,是在 SHAKE91 基础上改进得到的,是一种一维等效线性化<sup>[7-8]</sup>程序,也是目前应用最广泛的一维土层地震反应分析程序。

SHAKE2000 和 LSSRLI-1 虽同为等效线性化程序,但两者在同一地震动输入同一剖面下的计算结果存有一定差异,且对于不同类型场地,差异程度各不相同。通过实际场地及其地震动记录检验这两种程序的研究工作尚少<sup>[9-11]</sup>,主要原因是以往实际井下地震记录较少。

日本 KiK-net 台网近来得到了较多井下地震记录,为检验现有土层地震反应分析方法创造了条件。本文选取 KiK-net 台网典型场地,根据我国建筑抗震设计规范中场地的分类原则<sup>[12]</sup>,确定出日本 KiK-net 中台站的场地类别。运用 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 进行计算,给出 I~IV 类场地的地表加速度、加速度反应谱谱比及土层最大剪应变等计算结果,并将计算结果进行汇总后进行对比分析,得到不同场地条件下 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 的差异以及计算结果与实测记录之间的差别,为改进土层地震反应分析方法和程序提供基础。

## 1 台站及计算参数的选取

本文选取了日本 KiK-net 台网中 45 个台站为研究对象,根据中国《建筑抗震设计规范》对 45 个台

站进行场地类别划分,其中 I 类场地 11 个、II 类场地 17 个、III 类场地 9 个、IV 类场地 8 个。收集了这 45 个台站 95 次地震的基岩及地表地震动,采用 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 两种程序对所选地震波分别进行计算,主要从地表峰值加速度、加速度反应谱、加速度反应谱谱比以及土层最大剪应变等四个方面,对比分析这两种程序之间以及这两个程序计算结果与实测记录之间的差异程度。

由于场地实际勘察资料中没有提供土的非线性计算参数,本文根据土的非线性动剪切模量比和阻尼比的不确定性分析<sup>[13]</sup>,对同一剖面采用了三种非线性情况,分别为弱非线性条件、均值条件和强非线性条件。弱非线性条件对应文献<sup>[13]</sup>中动剪切模量比取极大值,而阻尼比取极小值;均值条件为动剪切模量比和阻尼比都取均值;强非线性条件为模量比取极小值,而阻尼比取极大值。计算所采用的不同土类的动剪切模量比  $G/G_{\max}$  和阻尼比  $\lambda$  与剪应变  $\gamma$  的关系曲线分别示于图 1 和图 2。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 地表峰值加速度对比

由于场地类别对 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 两种程序的计算结果影响较大<sup>[14]</sup>,故将不同场地类别以及不同非线性条件下 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 峰值加速度误差进行统计。在进行对比分析时,本文将峰值误差小于 20% 定义为基本可以接受或可忽略,以此为界限,对 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 二者计算出的峰值加速度以及计算与实测峰值加速度误差进行统计。由于不同场地中所选取的地震波数量不同,本文用百分比进行对比分析,分析结果见表 1 和表 2。数量词参考中国地震烈度表<sup>[15]</sup>并进行了修正,本文的统计中,“个别”为 10% 以下,“少数”为 10%~50%,“多数”为 50%~70%,“大多数”为 70%~90%,“绝大多数”为 90% 以上。

从表 1 可以看出,对于不同场地,SHAKE2000 与 LSSRLI-1 峰值加速度的差异由小到大依次为:弱非线性工况、均值工况、强非线性工况。

弱非线性情况下,I、II 类场地中,绝大多数情况下 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 峰值加速度误差可忽略;III、IV 类场地中,多数情况下二者峰值加速度

误差可忽略。

加速度误差在 I、II 类场地中大多数误差可忽略，二者在 III、IV 类场地中少数误差可忽略。

均值情况下,SHAKE2000 与 LSSRLI-1 峰值

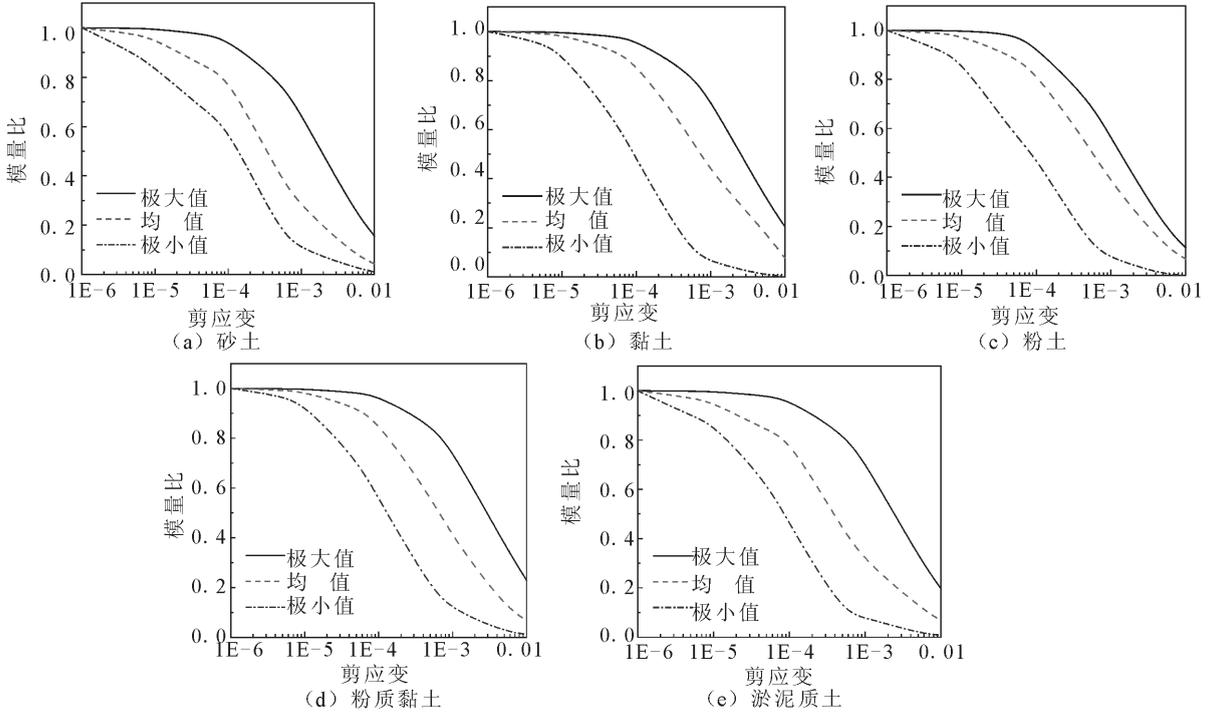


图 1 动剪切模量比与剪应变关系曲线

Fig.1 Relationship curves between dynamic shear modulus ratio and shear strain

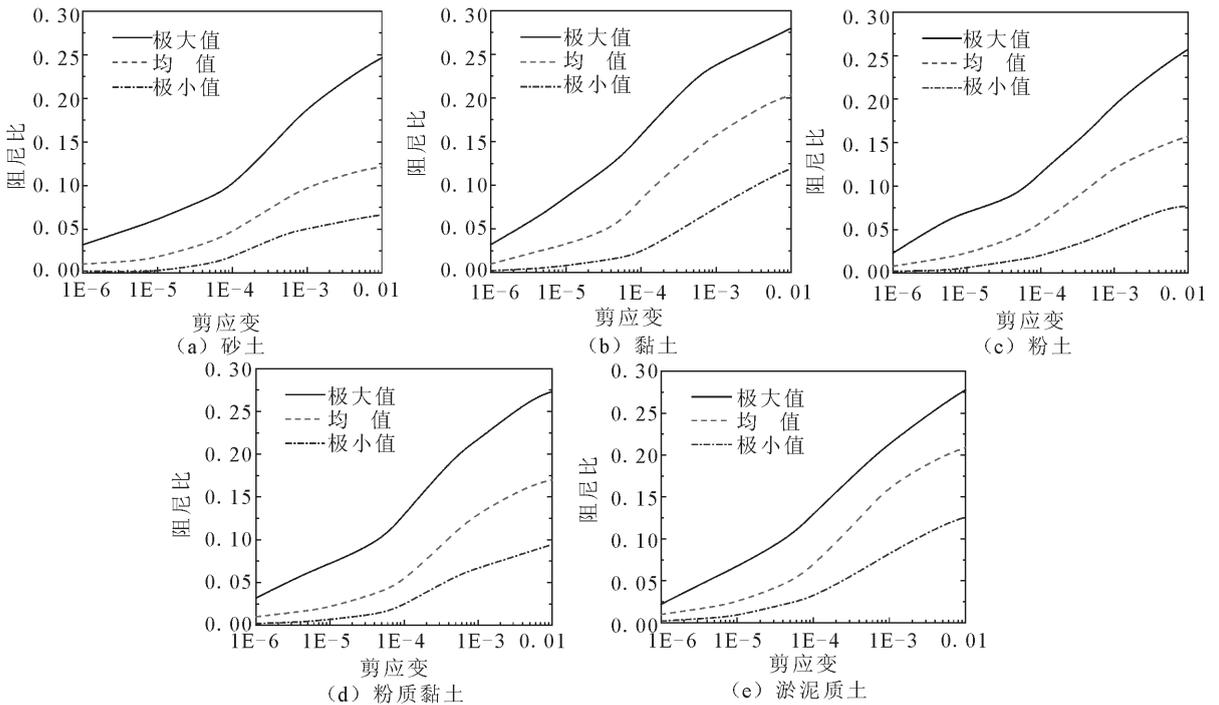


图 2 阻尼比与剪应变关系曲线

Fig.2 Relationship curves between damping ratio and shear strain

强非线性情况下, I、II 类场地中 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 峰值加速度大多数误差可以忽略, III、IV 类场地中少数误差可忽略。

综上所述,从整体来看, I、II 类场地中 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 峰值加速度大多数误差可忽略, III、IV 类场地中二者少数情况下误差可忽略。

表 1 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 计算的峰值加速度误差小于 20% 的工况统计 (%)

Table 1 Statistics for the conditions under which the errors of calculated peak acceleration are less than 20% by SHAKE2000 and LSSRLI-1 (%)

非线性	场地类别			
	I 类场地	II 类场地	III 类场地	IV 类场地
弱非线性	95	91	56	71
均值	86	80	50	46
强非线性	81	73	18	33

表 2 计算与实测峰值加速度误差小于 20% 的工况统计 (%)

Table 2 Statistics for the conditions under which the error between calculated and measured peak acceleration is less than 20% (%)

场地类别	计算方法	非线性		
		弱非线性	均值	强非线性
I 类场地	SHAKE2000	24	33	33
	LSSRLI-1	19	19	19
II 类场地	SHAKE2000	46	40	21
	LSSRLI-1	34	37	20
III 类场地	SHAKE2000	40	29	6
	LSSRLI-1	36	16	4
IV 类场地	SHAKE2000	29	23	11
	LSSRLI-1	64	7	0

从 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 与实测峰值加速度间的误差可以看出, I 类场地中, 三种非线性下计算结果基本相同, II、III、IV 类场地中, 计算结果由好到差依次为: 弱非线性工况、均值工况、强非线性工况, 体现了土的动力非线性对地表地震动的作用。

从表 2 中 SHAKE2000 与实测峰值加速度间的误差可以看出, 弱非线性和均值非线性下, SHAKE2000 与实测峰值加速度少数误差可忽略; 强非线性情况下, I、II、IV 类场地中 SHAKE2000 与实测峰值加速度少数误差可忽略, III 类场地中个别误差可忽略。

从表 2 中 LSSRLI-1 与实测峰值加速度间的误差可以看出, 弱非线性情况下, I、II、III 类场地中 LSSRLI-1 与实测峰值加速度少数误差可忽略, IV 类场地中 LSSRLI-1 与实测峰值加速度多数误差可忽略, 可见, 弱非线性情况下 IV 类场地计算结果好于 I、II、III 类场地计算结果; 均值情况下 I、II、III 类

场地中 LSSRLI-1 与实测峰值加速度少数误差可忽略, IV 类场地中二者仅个别误差可忽略, 可见, 均值情况下, I、II、III 类场地结果好于 IV 类场地; 强非线性情况下, I、II、III 类场地中 LSSRLI-1 与实测峰值加速度少数误差可忽略, IV 类场地中没有误差可忽略的工况, 可见 I、II、III 类场地结果好于 IV 类场地。

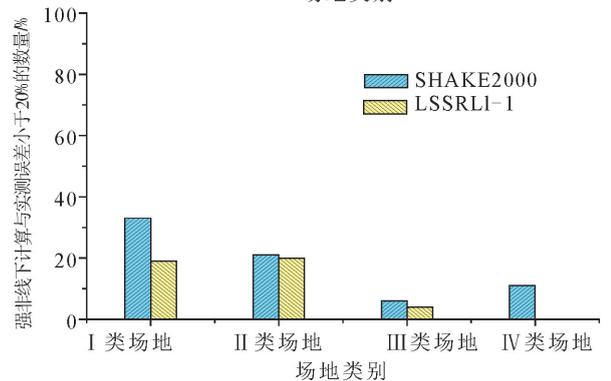
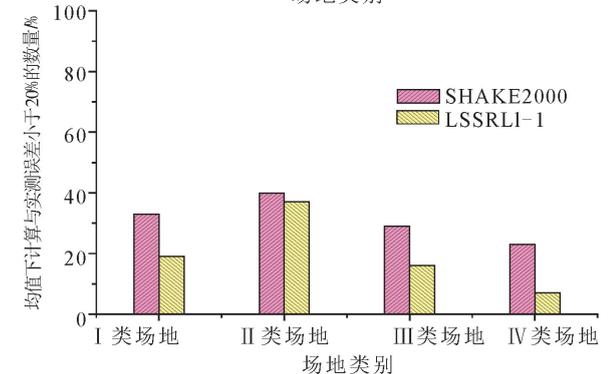
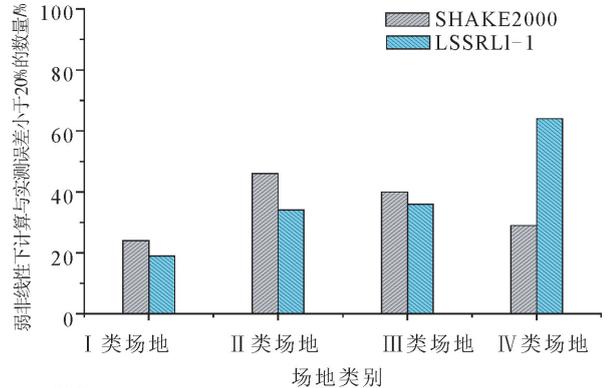


图 3 计算与实测峰值加速度误差小于 20% 的工况统计 (%)

Fig.3 Statistics for the conditions under which the error between calculated and measured peak acceleration is less than 20% (%)

从图 3 可以看出, 弱非线性情况下, I、II、III 类场地中 SHAKE2000 计算结果好于 LSSRLI-1, IV 类场地中 LSSRLI-1 计算结果好于 SHAKE2000。均值和强非线性情况下, I、II、III、IV 类场地中 SHAKE2000 计算结果均好于 LSSRLI-1。

## 2.2 加速度反应谱对比

以实测反应谱为基准,把 I 至 IV 类场地 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 计算反应谱与实测反应谱进行比较,用谱值比<sup>[16]</sup>可定性描述反应谱之间的差别。谱值比计算公式为

$$R(T) = \ln[S_{a,p}(T)] - \ln[S_{a,m}(T)] \quad (1)$$

其中, $S_{a,p}(T)$ 为计算反应谱; $S_{a,m}(T)$ 为实测反应谱。

为了定量判断计算结果与实测记录之间的误差,采用平均谱值比这一指标进行衡量。平均谱值比可表达为:

$$\overline{R(T)} = \frac{\sum_1^n R(\Delta T_i) \cdot \Delta T_i}{\sum_1^n \Delta T_i} \quad (2)$$

其中, $\overline{R(T)}$ 为平均谱值比; $\Delta T_i$ 为周期间隔(s); $R(\Delta T_i)$ 为谱值比。

谱值比曲线面积越大,说明谱值比曲线整体的起伏越大,与实测反应谱差别越大,相应的平均谱值比也大。平均谱值比经指数换算可转化为相对差,并根据相对差把差异程度分为四个等级,平均谱值比和相对差之间的换算关系见表 3。不同差异程度的工况数量占总工况的比例列于表 4。

图 4 和图 5 则进一步给出了差异较小的 GIFH22 台站和差异较明显的 MYGH06 台站中 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 计算反应谱与实测反应谱差异的对比情况。

表 3 差异程度的分级

Table 3 Classification of the difference degrees

	差异可忽略	有一定差异	较大差异	显著差异
相对差	[0,20%]	(20%,50%]	(50%,80%]	80%以上
平均谱值比 $\overline{R(T)}$	(-0.223,0.183)	[-0.693,-0.223]∪ [0.183,0.405]	[-1.609,-0.693]∪ (0.405,0.588]	小于-1.609 或大于 0.588

表 4 计算与实测反应谱之间的不同差异所占总工况比例(%)

Table 4 The proportion of difference between calculated and measured response spectrum in total conditions (%)

非线性	程序	场地类型	差异程度			
			差异可忽略	有一定差异	较大差异	显著差异
			0~20%	20%~50%	50%~80%	≥80%
弱非线性	SHAKE2000	I类	62	38	0	0
		II类	31	49	11	9
		III类	16	60	16	8
		IV类	43	36	14	7
	LSSRLI-1	I类	48	38	14	0
		II类	37	48	6	9
		III类	24	52	20	4
		IV类	43	50	7	0
均值	SHAKE2000	I类	57	38	5	0
		II类	34	46	11	9
		III类	21	54	25	0
		IV类	31	46	15	8
	LSSRLI-1	I类	43	38	19	0
		II类	34	37	20	9
		III类	17	54	25	4
		IV类	31	39	15	15
强非线性	SHAKE2000	I类	48	43	9	0
		II类	27	49	12	12
		III类	0	59	35	6
		IV类	0	33	56	11
	LSSRLI-1	I类	43	28	24	5
		II类	24	49	9	18
		III类	0	18	70	12
		IV类	0	22	44	33

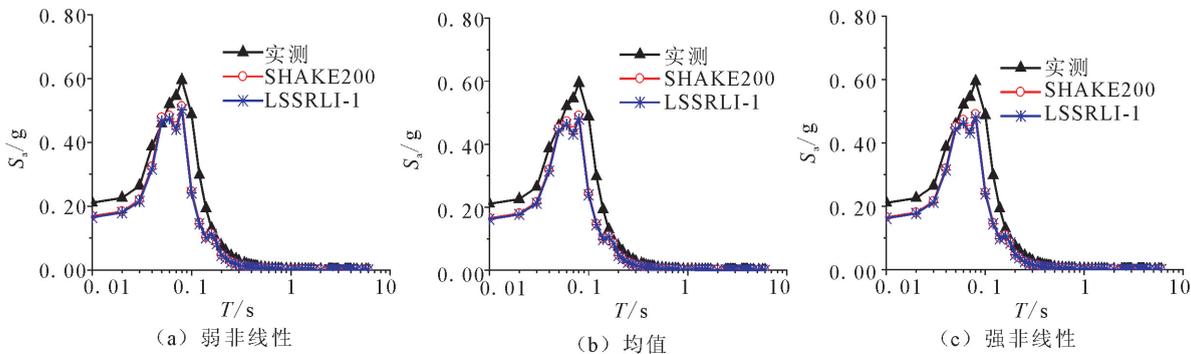


图 4 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 计算反应谱与实测记录对比 (I 类场地 GIFH22 台站)

Fig.4 Comparison of calculated response spectra and measured records (GIFH22 station of site I)

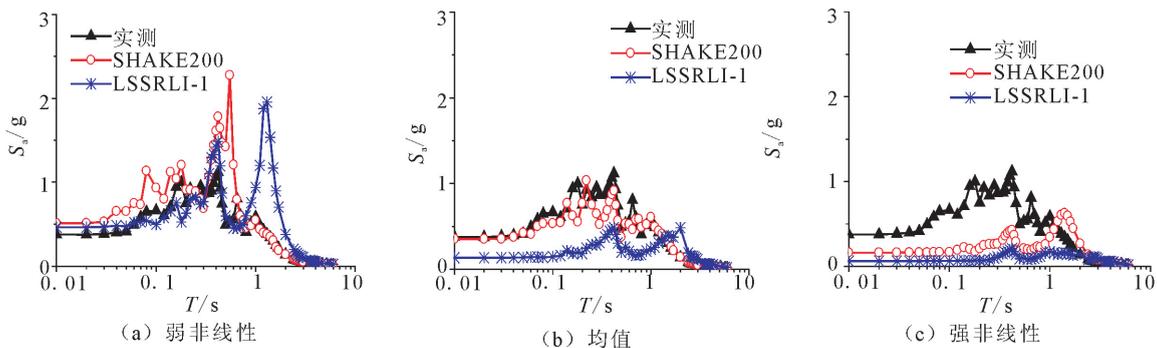


图 5 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 计算反应谱与实测记录对比 (一类场地 MYGH06 台站)

Fig.5 Comparison of calculated response spectra and measured records (MYGH06 station of site I)

由表 4 可知,弱非线性情况下 I 类场地中计算反应谱与实测记录差异比较可忽略数量 SHAKE2000 为 62%,LSSRLI-1 为 48%,且 LSSRLI-1 与实测值存在较大差异的数量多于 SHAKE2000,故 SHAKE2000 计算结果好于 LSSRLI-1 计算结果;II、III、IV 类场地中,LSSRLI-1 计算反应谱与实测记录差异比较,差异可忽略数量稍高于 SHAKE2000,存在一定差异和存在较大差异的数量略少于 SHAKE2000,故 LSSRLI-1 计算结果好于 SHAKE2000 结果。同理比较可得,均值和强非线性情况下,I、II、III、IV 类场地中 SHAKE2000 计算结果好于 LSSRLI-1 计算结果。

### 2.3 土层剪应变对比

为确定两种等效线性化程序之间的差别,将相同计算条件下两种程序计算得到的土层剪应变进行对比。I~IV 类场地中 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 最大剪应变误差小于 20% 的工况统计见表 5。图 6 和图 7 分别给了两个程序计算剪应变差别较小和差别较大的两个结果。

从表 5 可知,I 类场地中,SHAKE2000 与 LSSRLI-1 最大剪应变大多数误差小于 20%。II 类

场地中,弱非线性和均值工况下二者大多数误差可忽略,强非线性情况下二者多数误差小于 20%。III 类场地中,三种非线性条件下 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 最大剪应变多数误差小于 20%。IV 类场地中,均值和强非线性情况下 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 最大剪应变少数误差小于 20%,弱非线性下二者多数误差小于 20%。

表 5 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 最大剪应变误差小于 20% 的工况统计 (%)

Table 5 Statistics for condition under which the errors of calculated maximum shear strain are less than 20% by SHAKE2000 and LSSRLI-1 (%)

非线性	场地类别			
	I 类场地	II 类场地	III 类场地	IV 类场地
弱非线性	86	74	65	71
均值	76	74	69	46
强非线性	81	58	75	44

从图 4 和图 6 的对比可以看出,两个程序计算剪应变差别小,反应谱差别也小;由图 5 和图 7 的对比可以看出,剪应变差别大,反应谱差别也大。初步分析表明,SHAKE2000 与 LSSRLI-1 计算结果差异来自于计算剪应变的不同,但何种情况下影响大

还有待深入研究。

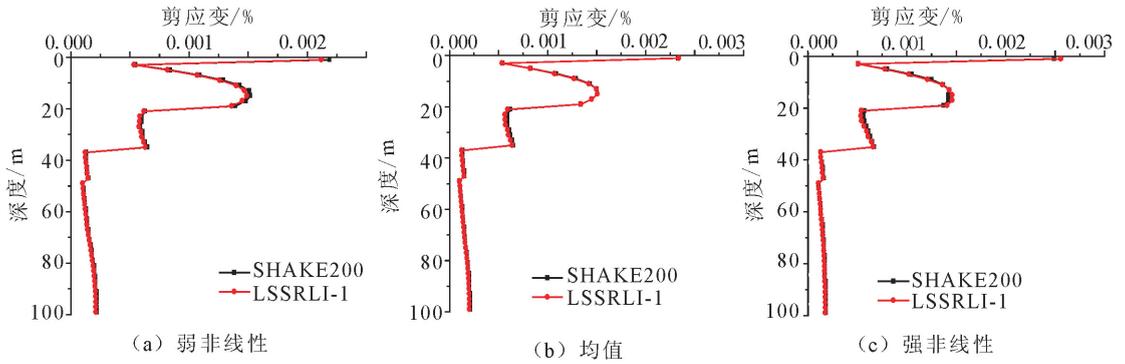


图6 SHAKE2000与LSSRLI-1计算剪应变对比(GIFH22 台站)

Fig.6 Comparison of shear strain calculated by SHAKE2000 and LSSRLI-1 (station GIFH22)

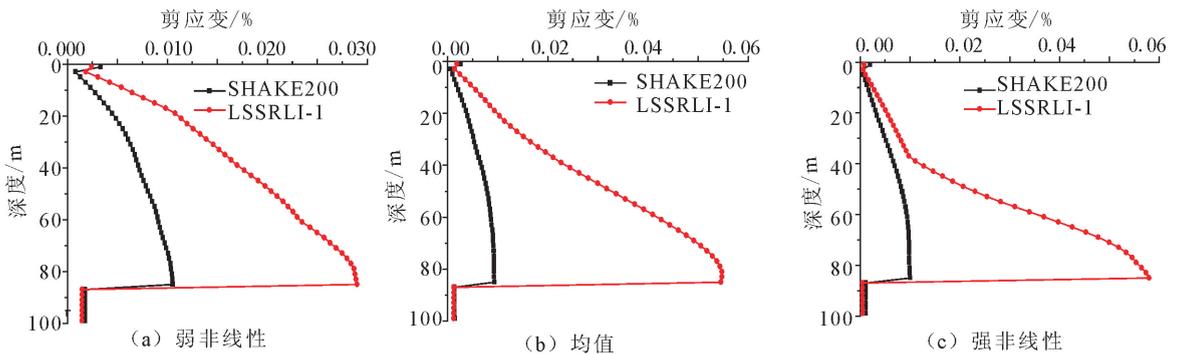


图7 SHAKE2000与LSSRLI-1计算剪应变对比(MYGH06 台站)

Fig.7 Comparison of shear strain calculated by SHAKE2000 and LSSRLI-1 (station MYGH06)

### 3 结论

本文对比了不同类别场地中 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 的计算结果,主要从地表峰值加速度、加速度反应谱谱值比和最大剪应变几方面进行分析,主要结论为:

(1) 总体来看,土的动模量和阻尼比的非线性对计算结果有较大影响,对于不同场地,SHAKE2000 与 LSSRLI-1 计算的峰值加速度、加速度反应谱以及最大剪应变差异由小到大依次为:弱非线性工况、均值工况、强非线性工况,体现了土的动力非线性对地表地震动的影响。

(2) 总体来看,场地类别对计算结果影响较大,I类、II类、III类、IV类场地 SHAKE2000 和 LSSRLI-1 计算的峰值加速度、加速度反应谱以及最大剪应变误差依次递增。

(3) 从 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 峰值加速度来看,弱非线性下 I 类和 II 类场地中绝大多数误差可以忽略,III、IV类场地中多数误差可以忽略;均值和强非线性下,I类和 II 类场地中大多数误差可以

忽略,III、IV类场地中少数误差可以忽略。

(4) 以实测峰值加速度误差为依据,SHAKE2000 与 LSSRLI-1 对所有工况均与实测记录存在差异,但 SHAKE2000 结果要好于 LSSRLI-1 结果,特别在均值和强非线性下,III、IV类场地中 SHAKE2000 结果要明显好于 LSSRLI-1 结果。

(5) 以平均谱值比为依据,SHAKE2000 与 LSSRLI-1 对所有工况均与实测结果存有差异。弱非线性下,I类场地中 SHAKE2000 计算结果好于 LSSRLI-1 计算结果,II、III、IV类场地中 LSSRLI-1 计算结果好于 SHAKE2000 结果。均值和强非线性下,SHAKE2000 计算结果要好于 LSSRLI-1 计算结果。对于强非线性工况,III、IV类场地中 SHAKE2000 结果要明显好于 LSSRLI-1 结果。

(6) 从土层最大剪应变来看,弱非线性工况下,I、II类场地中 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 最大剪应变大多数误差小于 20%;III、IV类场地中两者多数误差小于 20%。均值情况下,I、II类场地中两者大多数误差小于 20%;III类场地中,多数误差小

于 20%;Ⅳ类场地中,少数误差小于 20%。强非线性情况下,Ⅰ、Ⅲ类场地中 SHAKE2000 与 LSSR-LI-1 最大剪应变大多数误差小于 20%;Ⅱ类场地中两者多数误差小于 20%;Ⅳ类场地中,两者少数误差小于 20%。

(7) 初步分析表明,SHAKE2000 与 LSSR-LI-1 计算结果差异来自于计算剪应变的不同,但何种情况下影响大还有待深入研究。

## 参考文献 (References)

- [1] Idriss I M, H B Seed. Seismic Response of Horizontal Soil Layers[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1968, 94(4): 1003-1031.
- [2] Martin P P, Seed H B. One-dimensional Dynamic Ground Response Analyses[J]. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1982, 108(7): 935-952.
- [3] 李小军. 一维土体地震反应线性化计算程序[C]//地震小区化(理论与实践). 北京:地震出版社, 1989: 250-265.  
LI Xiao-jun. The Soil Seismic Response of One-dimensional Linear Calculation Program[C]//Seismic Microzonation (Theory and Practice). Beijing: Seismological Press, 1989: 250-265. (in Chinese)
- [4] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京:地震出版社, 1999.  
HU Lv-xian. Tutorial of Seismic Safety Evaluation[M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese)
- [5] 中国地震局. GB 17741-2005 工程场地地震安全性评价技术规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2005.  
China Earthquake Administration. GB 17741-2005 Code for Seismic Safety Evaluation of Engineering Sites[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2005. (in Chinese)
- [6] SHAKE2000 User's Manual. A Computer Program for the 1D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems.
- [7] 廖振鹏, 李小军. 地表土层地震反应的等效线性化解法[C]//地震小区化(理论与实践). 北京:地震出版社, 1989: 141-153.  
LIAO Zhen-peng, LI Xiao-jun. Equivalent Linearization Method for Solving the Seismic Response of the Surface Soil[C]//Seismic Microzonation. Beijing: Seismological Press, 1989: 141-153. (in Chinese)
- [8] 齐文浩, 薄景山. 土层地震反应等效线性化方法综述[J]. 世界地震工程, 2007, 23(4): 221-226.  
QI Wen-hao, BO Jing-shan. Summarization on Equivalent Linear Method of Seismic Responses for Soil Layers[J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(4): 221-226. (in Chinese)
- [9] 齐文浩, 薄景山, 刘德东, 等. 强震记录对三个土层地震反应分析程序的检验[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(5): 30-33.  
QI Wen-hao, BO Jing-shan, LIU De-dong, et al. A Test for Three Programs of Soil Layer Seismic Response Analysis by Strong Earthquake Record[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2005, 25(5): 30-33. (in Chinese)
- [10] 齐文浩. 土层地震反应分析方法的比较研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所, 2004.  
QI Wen-hao. Study on the Comparison of Soil Layers Seismic Response Analysis Methods[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2004. (in Chinese)
- [11] 皮净灵. 地震作用下场地土的反应分析[D]. 广州:暨南大学, 2008.  
PI Jing-ling. Seismic Response Analysis of Site Soil[D]. Guangzhou: Jinan University, 2008. (in Chinese)
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. GB 50011-2010 Code for Seismic Design of Building[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [13] 孙锐, 陈红娟, 袁晓铭. 土的非线性动剪切模量比和阻尼比不确定性分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(8): 1228-1235.  
SUN Rui, CHEN Hong-juan, YUAN Xiao-ming. Uncertainty of Non-linear Dynamic Shear Modulus Ratio and Damping Ratio of Soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(8): 1228-1235. (in Chinese)
- [14] Franciso J, Sanchez-Sesma. Site Effects on Strong Ground Motion[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1987, 6(2): 124-132.
- [15] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17742-2008 中国地震烈度表[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.  
Standardization Administration of the PRC. GB/T 17742-2008 Chinese Seismic Intensity Scale[S]. Beijing: Chinese Standard Press, 2008. (in Chinese)
- [16] Annie O L, Kwok Jonathan P, Stewart Youssef M A. Hashash. Nonlinear Ground-response Analysis of Turkey Flat Shallow Stiff-soil Site to Strong Ground Motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2008, 98(1): 331-343.