

## 两种计算程序对弱非线性硬场地 地震响应的计算比较\*

于啸波, 孙 锐, 袁晓铭, 陈龙伟

(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:** 讨论了土为具有弱非线性的硬场地地下两种程序 LSSRLI-1 与 SHAKE2000 计算土层地震动的异同性。以 2 个 I 类、4 个 II 类场地构造土层剖面, 输入 3 种不同类型地震波, 对比分析后的主要结果为: I 类场地两个程序计算出的 PGA 十分接近, II 类场地 PGA 的差别平均意义上也可以忽略, 但某些情况下差异较大; I 类场地两个程序计算出的反应谱差别很小, II 类场地反应谱存在差异, 但变化范围不大; I 类场地中剪应变结果差异很小, 而在 II 类场地中差异变化范围很大; PGA 相对差和反应谱相对差与剪应变相对差之间存在相关性; PGA、反应谱的差异很可能来源于两程序剪应变计算方法的不同。

**关键词:** LSSRLI-1; SHAKE2000; 相对差; 谱值比; 土层地震反应分析

**中图分类号:** P315-39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2015)04-0652-10

### 0 引言

土层地震动计算在地震工程中具有重要意义。常用的地震反应分析方法是一维等效线性化方法(齐文浩, 2004), LSSRLI-1 与 SHAKE2000 是这种方法的代表程序(廖振鹏, 1989): 前者代表了 20 世纪 90 年代的国际水平, 是我国目前工程地震安全性评价工作规定使用的分析程序; 后者最初由 Schnable 等(1972)编写, 并陆续推出了 91、2000 等改进版本, 代表着目前国际上的先进水平, 这两个程序都能在一定工况下得到可信的结果。按照我国抗震规范美国 La Cienega 台阵场地属于 II 类场地, 该台阵记录到了 1999 年 M7.1 地震从地下 252 m 处到地表的地震动, 地下记录输入到 SHAKE91 中, 计算得到的地表地震动与实际记录较吻合(Haddadi, Shakal, 2006)。将位于 II 类场地响哩台阵 3 号测井的地震记录输入到 LSSRLI-1 与 SHAKE91 中, 地表反应都与记录相近, 这表明输入地震动强度较低时, LSSRLI-1 与 SHAKE91 可以基本满足工程需要(齐文浩, 2004)。以上结果都是基于计算与实测的对比, 从一个侧面证明了两程序的可靠性, 但存在实测记录少、工况数

量不足的局限。

鉴于我国井下台阵较少, 一些学者在没有强震记录的情况下, 也进行了一些两程序间的对比分析, 李亚东(2011)对 LSSRLI-1 与 SHAKE91 进行比较发现, LSSRLI-1 结果偏大, 特别是在土层刚度小强震作用下更明显。另外, LSSRLI-1 在计算中还可能出现计算不收敛情况(齐文浩, 2008)。但是, 目前对于 SHAKE 与 LSSRLI-1 的对比分析, 还缺乏系统性, 没有进行深入的对比及分析差异原因。

场地条件对于等效线性化计算分析会有较大的影响(景立平等, 2005)。实际场地有不同分类方式, 除去软、硬夹层等特殊状况(李恒等, 2014), 大致可分为软硬两种类型(岩土工程勘察规范, GB50021—2001)。在我国抗震规范中, 场地分类与岩土勘察规范的意义有所不同, 不仅考虑岩土体的剪切波速, 还考虑了覆盖层的厚度。I、II 类场地土层具有相对高的剪切波速, 覆盖层厚度相对小, 是抗震有利的场地。以往的研究结果显示, 在较硬场地上, 等效线性化方法往往能够有较好的表现(齐文浩, 2004; Haddadi, Shakal, 2006), 但由于对比的工况较少, 仍需进一步研究。理论上讲, 等效线性化方法更适用

\* 收稿日期: 2014-09-02.

**基金项目:** 中央级公益性研究所基本科研业务费专项——土层地震反应分析方法改进关键问题研究(2013B03)和国家科技部地震行业专项——复杂场地地震反应分析方法研究及工程应用程序开发(201408020-03)联合资助。

于土的动力非线性较弱时，即土的模量衰减与阻尼比的增长曲线相对平缓，而硬场地往往具有这样的动力特性。本文选择较硬的Ⅰ、Ⅱ类场地为研究对象，并将这些工况简称为弱非线性硬场地。

本文以构造的 2 个Ⅰ类和 4 个Ⅱ类场地土层剖面为研究对象，输入 3 种不同频率类型的地震波，采用两种等效线性化分析程序 LSSRLI - 1 与 SHAKE 计算土层地震动，以期掌握两种典型土层地震反应分析方法的异同性。

1 计算理论与计算模型

1.1 水平成层土中波动方程的解

LSSRLI - 1 与 SHAKE2000 都是一维土层反应分析程序，以一维剪切波在水平成层介质中的地震反应稳态解为基础编制的。

首先，底层输入频域地震位移为  $E_N \exp(ik_N z)$  的地震波时，第  $n$  层地震波位移的频域稳态一般解为

$$U_n(z) = E_n \exp(ik_n z) + F_n \exp(-ik_n z). \tag{1}$$

式中， $k_n = (1 - id_n) \cdot \omega/c_n$ ， $d_n$  为第  $n$  层的阻尼比； $c_n = (1 + id_n) \cdot \sqrt{\mu_n/\rho_n}$ ， $\mu_n$  为第  $n$  层剪切模量。 $E_n$ 、 $F_n$  为波幅系数，需要用传递矩阵进行求解：

$$\begin{bmatrix} E_{n+1} \\ F_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1+\alpha_n}{2} \exp(ik_n h_n) & \frac{1-\alpha_n}{2} \exp(-ik_n h_n) \\ \frac{1-\alpha_n}{2} \exp(ik_n h_n) & \frac{1+\alpha_n}{2} \exp(-ik_n h_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_n \\ F_n \end{bmatrix}. \tag{2}$$

式中， $\alpha_n = \rho_n c_n / \rho_{n+1} c_{n+1}$ ，为相邻两层的复波阻抗比值。(2) 式右边左乘的矩阵可以根据每一层的土层信息计算出来。根据 (2) 式由  $E_1$ 、 $F_1$  推出各层的  $E_n$ 、 $F_n$ 。但  $E_1$ 、 $F_1$  开始是未知的，需要根据已知的波幅系数  $E_N$  来得到，关系如下

$$E_1 = F_1 = E_N / e_N. \tag{3}$$

式中， $E_N$  为已知的输入地震波波幅系数； $e_N$  通过 (2) 式中的传递矩阵得到。由 (2)、(3) 式可递推出从 1 层到  $N$  层的波幅系数  $E$ 、 $F$ 。这样可以通过 (1) 式得到各层的位移，再进行傅式逆变换就得到了时域位移，进而可得速度、加速度。但是因为实际的土层是非线性系统，因此叠加原理失效，不能进行傅式变换，所以需要引入等效线性

化的假设，让系统成为可以使用傅式变换的线性系统（廖振鹏，2003）。

1.2 计算模型

根据建筑抗震设计规范（GB50011—2010）中场地分类的条款，构造了 2 个Ⅰ类、4 个Ⅱ类场地的土层剖面。Ⅰ类场地模型因为比较薄，所以在程序中仅分为 4 个计算层，前 3 层为土层，第 4 层为基岩，土的物理力学特征见表 1。Ⅱ类场地模型的计算层厚度一般为每层 2 ~ 3 m，土层物理力学特征见表 2。

表 1 Ⅰ类场地土层的物理力学性质

Tab. 1 Physical and mechanical properties of class - I sites

剖面	土类型	密度/kg · m <sup>-3</sup>	剪切波速/m · s <sup>-1</sup>	土层厚度/m
Ⅰ - 1	粘土	1 640	350	3
	基岩	2 200	800	
Ⅰ - 2	粘土	1 640	300	1
	粘土	1 640	400	2
	基岩	2 200	800	

表 2 Ⅱ类场地土的物理力学性质

Tab. 2 Physical and mechanical properties of class - II sites

剖面	土类型	密度/kg · m <sup>-3</sup>	剪切波速/m · s <sup>-1</sup>	土层厚度/m
Ⅱ - 1	粘土	1 640	200	24
	基岩	2 200	800	
Ⅱ - 2	粘土	1 640	150	8
	粘土	1 640	250	16
	基岩	2 200	800	
Ⅱ - 3	粘土	1 640	120	10
	基岩	2 200	800	
Ⅱ - 4	粘土	1 640	100	3
	粘土	1 640	150	6
	基岩	2 200	800	

考虑到输入地震波对两程序计算结果（PGA、反应谱和剪应变）差异程度有影响，输入的地震波需要具有一定的代表性。本文选择 5% 阻尼比反应谱中长周期成分占优、短周期成分占优以及成分比较均匀的地震波，确定输入地震波为 El - Centro 地震波、AKTH19 地震波和 KSRH 地震波（图 1）。AKTH19 与 KSRH 均为日本 Kik - net 台站代码，输入地震波信息见表 3。从反应谱来看（图 2），KSRH 地震波短周期成分丰富，AKTH19 地震波长周期成分丰富，El - Centro 地震波介于之间，以此代表频率成分不均匀的地震波。将地震波都

调幅至 0.1 g、0.2 g 与 0.4 g 进行输入，分别代表Ⅶ、Ⅷ和Ⅸ度区。这样，Ⅰ类场地的两个剖面、3 条地震波和 3 个幅值，共有 18 个组合工况，同样Ⅱ类场地共有 36 个组合工况。

本文使用的非线性曲线是陈红娟（2009）提出的粘土的模量衰减曲线上限与阻尼比增长曲线的下限的组合，代表着土为弱非线性的情况，数值如表 4 所示。

表 3 输入地震波基本信息  
Tab. 3 Basic information of the inputting waves

本地地震波	发震时间/年-月-日	台站地点	震级 ( <i>M</i> )	方向	加速度峰值/gal	数据步长
El-Centro	1940-05-18	El Centro	Imperial Valley <i>M</i> 7.1 地震	N-S	326	0.02 s
AKTH19	2011-03-11	AKTH19, Kik-net	“3·11” <i>M</i> 9.0 大地震	N-S	20.89	0.01 s
KSRH	2004-11-29	KSRH09, Kik-net	<i>M</i> 7.1 地震	E-W	30.56	0.005 s

表 4 土层非线性曲线  
Tab. 4 Non-linear curves of profiles

土类	模量比与 阻尼比	剪应变 $\gamma$ ( $\times 10^{-4}$ )							
		0.05	0.1	0.5	1	5	10	50	100
粘土	$G/G_{\max}$	0.998	0.997	0.981	0.963	0.838	0.721	0.340	0.205
	$\lambda/\lambda_{\max}$	0.005	0.008	0.016	0.022	0.058	0.074	0.108	0.119
基岩	$G/G_{\max}$	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	$\lambda/\lambda_{\max}$	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050

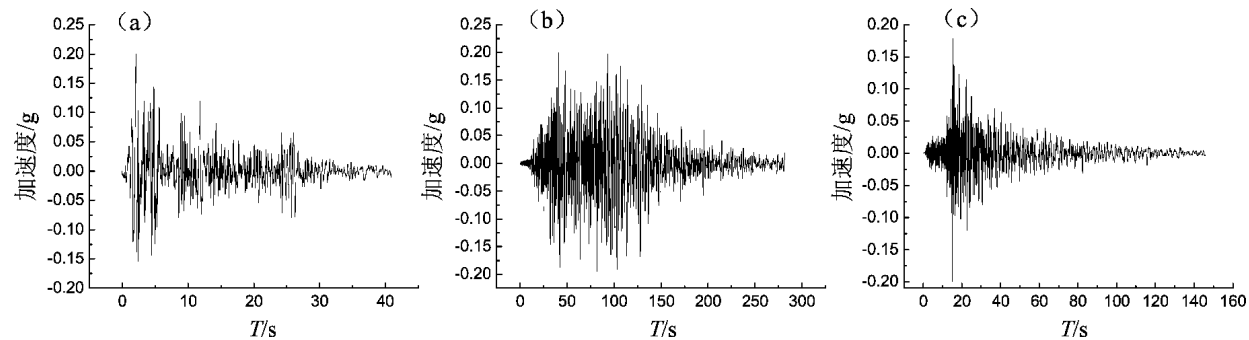


图 1 输入 El Centro (a)、AKTH19 (b) 和 KSRH (c) 不同地震波时的波形  
Fig. 1 Waveform of the inputting El Centro (a), AKTH19 (b) and KSRH (c) earthquakes

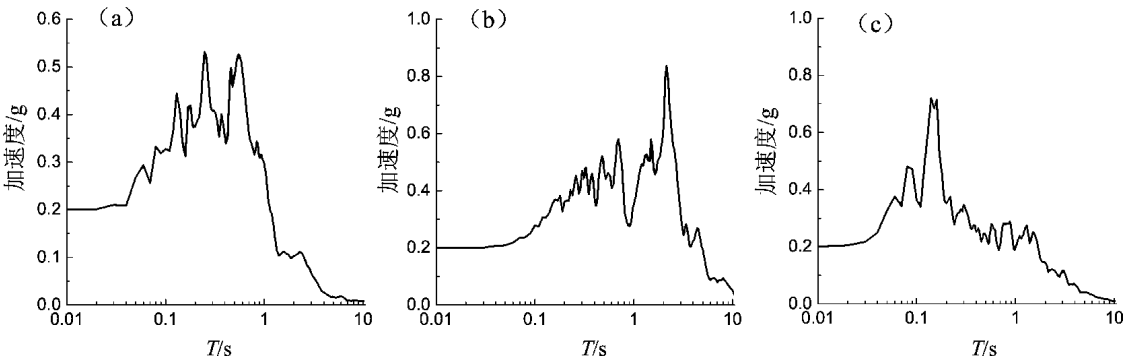


图 2 输入 El Centro (a)、AKTH19 (b) 和 KSRH (c) 不同地震波时的加速度反应谱 (5% 阻尼比)  
Fig. 2 Acceleration response spectrum of the inputting El Centro (a), AKTH19 (b) and KSRH (c) earthquakes (5% damping ratio)

## 2 结果比较

本文主要比较 LSSRLI-1 与 SHAKE 两个程序计算出的地表加速度峰值、加速度反应谱和最大剪应变。相对差以 SHAKE2000 结果作为基准进行计算。

### 2.1 加速度峰值

结果表明, 两个程序计算出的 I 类场地的地表加速度峰值 PGA 的相对差变化范围是 (0 ~ 1.4)%, 平均值为 0.6%, 差异很小。从图 3 可见, 加速度峰值的相对差随埋深变化, 而且靠近地表的时候相对差较大; 剖面 I-2 的相对差都较小, 沿深度变化不大。

两个程序计算出的 II 类场地的地表加速度峰值 PGA 的相对差变化范围是 (0.03 ~ 30.7)%, 平均值为 6.6%, 可以看出, 与 I 类场地相比, 差异

程度的变化范围变大。由图 4 可见, 不同深度相对差有所不同, 而且最大的相对差并不一定出现在地表处。

不同输入地震波对 PGA 结果的影响见图 5。由图可见, 输入 3 种地震波的计算结果具有很相近的分布, 相对差都集中在 10% 以内。这表明, 在弱非线性硬场地条件下, 对于不同地震波, LSSRLI-1 与 SHAKE2000 的大部分 PGA 计算结果是相近的。

### 2.2 反应谱

为了对比反应谱间的差异, 得到两个程序计算的地表加速度反应谱的谱值比为

$$R_s = \ln(S_L) - \ln(S_s). \quad (4)$$

其中,  $S_s$  是 SHAKE2000 的反应谱结果 (g),  $S_L$  是 LSSRLI-1 的反应谱结果 (g)。

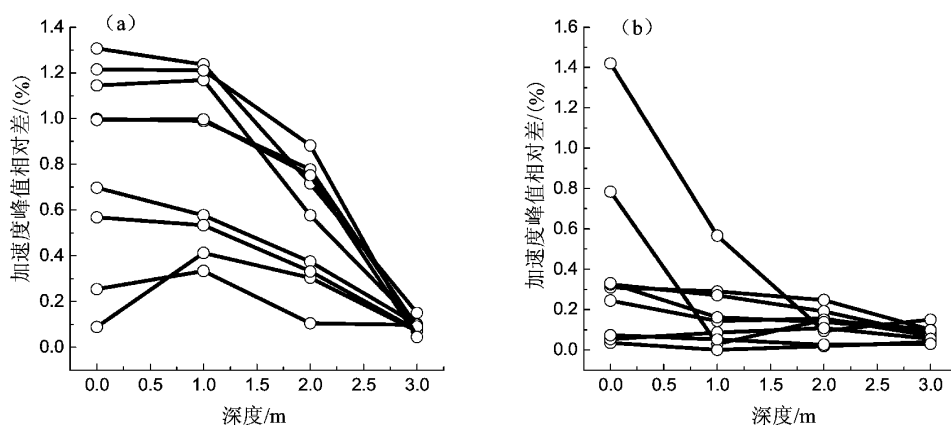


图 3 I 类场地加速度峰值相对差随埋深的变化

(a) 剖面 I-1 工况; (b) 剖面 I-2 工况

Fig. 3 Relative difference of acceleration peak value varies with depth in class-I sites

(a) profile I-1 condition; (b) profile I-2 condition

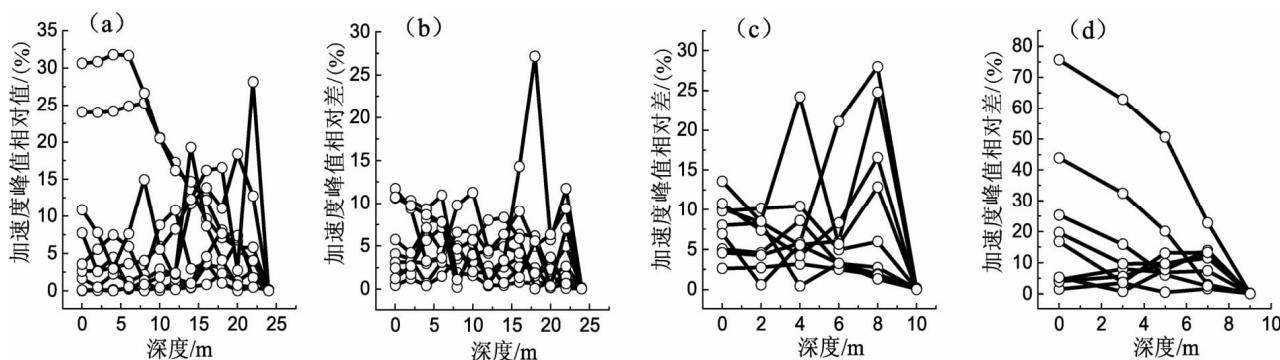


图 4 II 类场地加速度峰值相对差随埋深的变化

(a) 剖面 II-1 工况; (b) 剖面 II-2 工况; (c) 剖面 II-3 工况; (d) 剖面 II-4 工况

Fig. 4 Relative deviation of acceleration peak value varies with depth in class-II sites

(a) profile II-1 condition; (b) profile II-2 condition; (c) profile II-3 condition; (d) profile II-4 condition

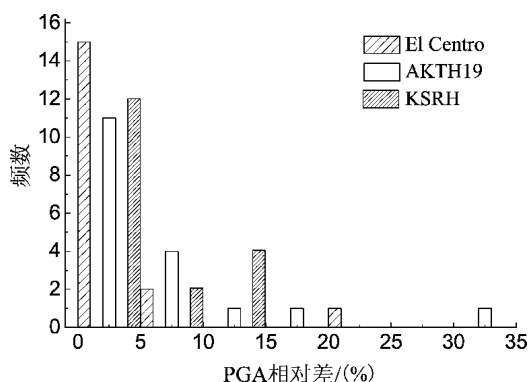


图5 不同输入地震波下 I、II 类场地加速度峰值相对差统计直方图

Fig. 5 Relative deviation histogram of acceleration peak in class-I and class-II sites under different inputting waves

本文进一步采用平均谱值比来表示两种程序计算的加速度反应谱的平均差异,按下式计算:

$$\overline{R_s} = \sum_{i=1}^n R_{si} \cdot \Delta T_i / \sum_{i=1}^n \Delta T_i \quad (5)$$

其中,  $\overline{R_s}$  是平均谱值比;  $\Delta T_i$  是周期间隔 (s);  $R_{si}$  是每个周期对应的谱值比。

计算表明, I 类场地平均谱值比均值是 0.3%, 变化范围是 (0.1 ~ 0.6)%; II 类场地的平均谱值比均值是 2.3%, 变化范围是 (0.2 ~ 12.3)%。

图 6a 是 I 类场地计算结果。从各工况结果可见, 在周期  $T = 0.03$  s 附近,  $R_s = 0.6$  (相当于相对差为 45.1%), 两程序在这个周期附近的反应谱结果差异较大; 0.1 s 之后, 反应谱结果差异很小。

图 6b 是 II 类场地计算结果。从各工况结果的曲线看, 反应谱结果的相对差在 3 s 以前存在较大的波动, 与 I 类场地相比, 反应谱的较大差异从短周期段发展到了长周期段。

谱比值反映的是反应谱间的相对差, 不同输入地震波下 I、II 类场地反应谱相对差统计结果见图 7。由图可见, 输入 3 种地震波计算的结果具有相近的分布, 而且不超过 20%。这表明, 在弱非线性硬场地条件下, 两个程序在输入不同地震波时, 反应谱计算结果是相近的。

### 2.3 最大剪应变

LSSRLI-1 与 SHAKE2000 给出了每一计算层内的剪应变峰值, 在不同埋深处, 剪应变峰值也不同, 笔者对剪应变峰值随埋深变化曲线上的最大值进行比较。结果表明, I 类场地剪应变相对

差变化范围是 (0.7 ~ 9.0)%, 均值为 4.4%; II 类场地的剪应变相对差变化范围是 (0.7 ~ 303.0)%, 均值为 46.4%。

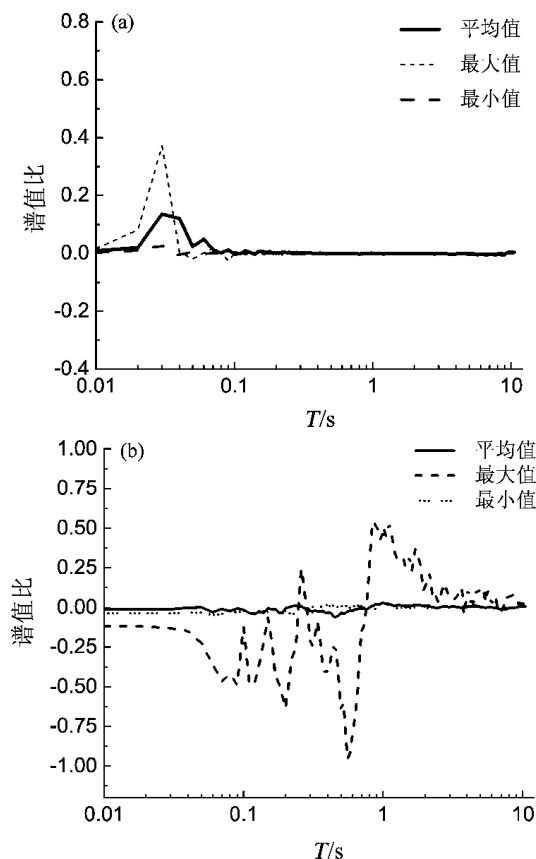


图6 I类 (a)、II类 (b) 场地反应谱谱值比汇总

Fig. 6 Spectral ratio of response spectrum of class-I (a) and class-II sites (b)

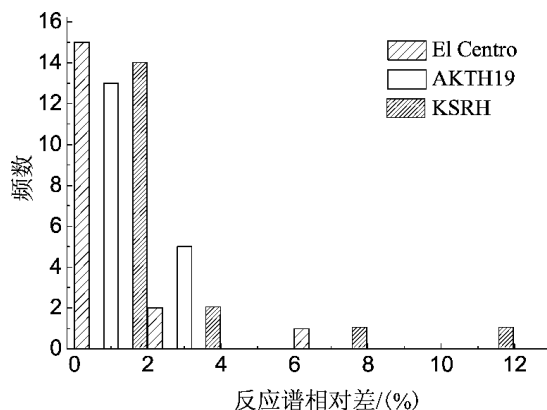


图7 不同输入地震波下 I、II 类场地反应谱相对差统计直方图

Fig. 7 Relative deviation histogram of response spectrum in class-I and class-II sites under different inputting waves

图8为最大剪应变相对差的频率分布直方图,从图中可以看出两个程序计算出的最大剪应变在Ⅰ类场地上比较相近,相对差在10%内波动(图8a);而Ⅱ类场地的相对差变化范围则较大,主要集中在50%以内,但最大可达300%(图8b)。

按照不同的输入地震波,将剪应变峰值相对差进行统计,结果见图9。由图可见,3种地震波造成的剪应变峰值差异程度具有相近的分布,但剪应变峰值相对差大于100%的情况均来自于KSRH地震波输入。

## 2.4 剪应变相对差与PGA、反应谱相对差的相关性

经过对比分析发现,剪应变、反应谱和PGA相对差间有一定的关联,其中一个较大时,其余两个也较大。图10a、b给出了一工况中剪应变差异与相应的反应谱差异,从图中可以看出,SHAKE2000计算得到的最大剪应变为 $17.7 \times 10^{-4}$ ,而LSSRLI-1为 $17.6 \times 10^{-4}$ ,相对差为0.5%。SHAKE2000计算的PGA为0.28 g, LSSRLI-1也为0.28 g,结果相同。反应谱最大相对差为16%。图10c、d为另一工况的计算结果,由图可知,SHAKE2000计算得到的最大剪应变为 $83.1 \times 10^{-4}$ ,而LSSRLI-1的为 $144 \times 10^{-4}$ ,相对差为72.6%;SHAKE2000计算的PGA为0.81 g,而LSSRLI-1的为0.61 g,两者之间的相对差为24%。反应谱最大相对差为59%。由此可见,当剪应变差异越大,则PGA和反应谱的差异越大,三者之间存在一定的关联性。

## 2.5 差异原因初步分析

两个程序的基本原理相同,输入的参数相同,计算结果的差异极有可能是程序内部某些参数的计算方法或算法不同造成的。在迭代过程中,会变化的参数是根据等效剪应变来取值的土层模量比、阻尼比。等效剪应变计算都是剪应变峰值乘以折减系数,计算中该系数均为0.65,即等效剪应变计算方法相同。但从前文第2.3节可以看出,两程序的剪应变峰值是不同的,所以两程序迭代计算得到的等效剪应变也是不同的。因此,迭代中剪应变的不同计算方法是导致不同计算结果的原因。此外,迭代中模量比、阻尼比的插值方法也可能不同。有研究表明,土层地震反应结果对模量比与阻尼比很敏感(刘红帅等,2005;孙锐等,2009),这也能导致两程序的计算结果有差异。

为了表明两程序的计算结果差异来自内部计算方法不同,笔者给出一个算例。采用图10c、d的工况,即在剖面Ⅱ-1输入0.4 g的El-Centro地震波。在这个工况中,SHAKE2000与LSSRLI-1

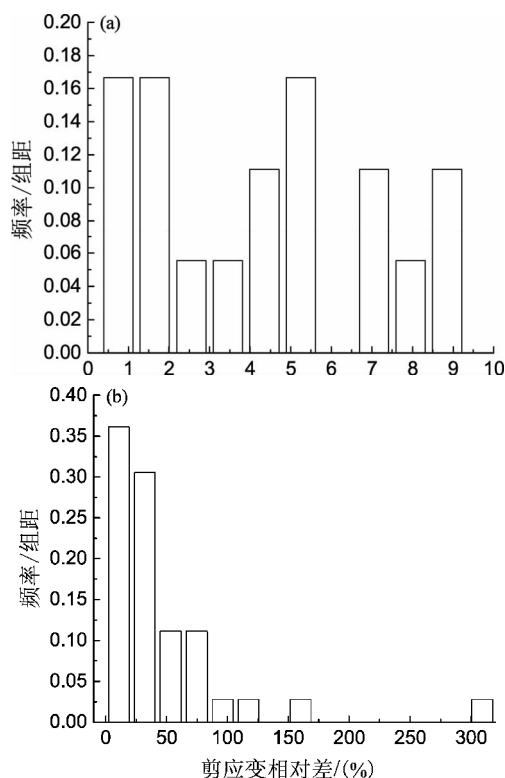


图8 Ⅰ类(a)、Ⅱ类(b)场地最大剪应变相对差频率分布直方图

Fig. 8 Frequency distribution histogram of maximum shear strain deviation in class-Ⅰ site (a) and class-Ⅱ site (b)

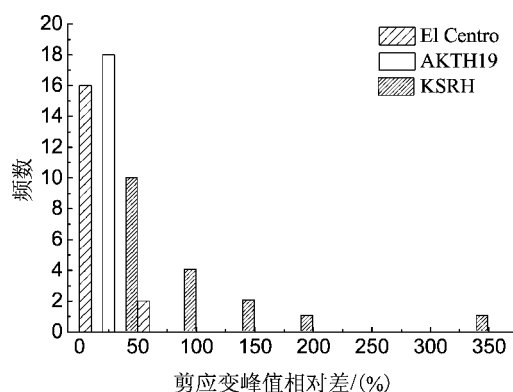


图9 不同输入地震波下Ⅰ、Ⅱ类场地剪应变峰值相对差统计直方图

Fig. 9 Relative deviation histogram of shear strain peak in class-Ⅰ and class-Ⅱ sites under different inputting waves

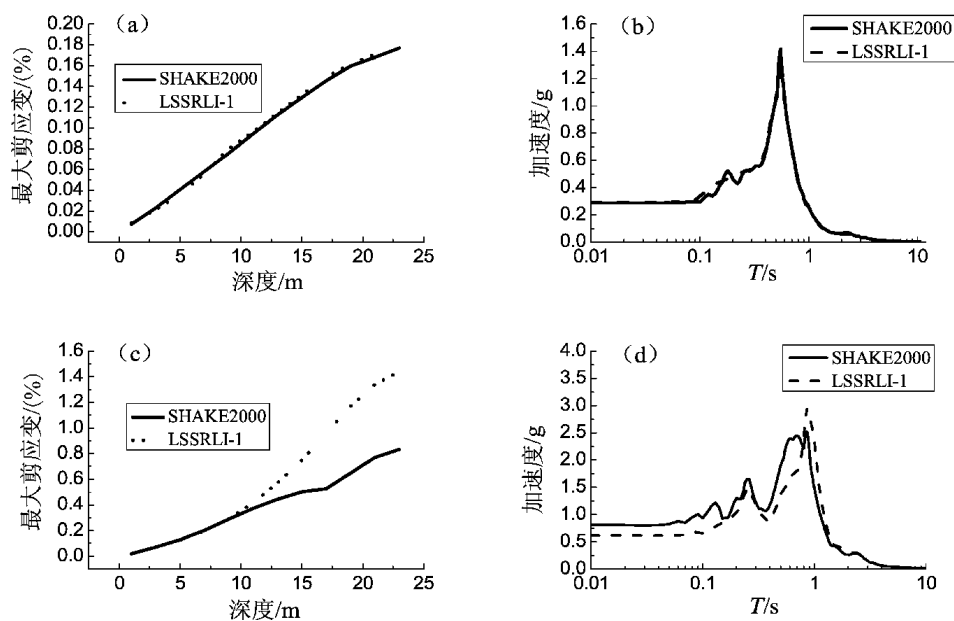


图 10 剖面 II-1 输入 El-Centro 地震波的剪应变及反应谱

(a) 输入 0.1 g El-Centro 地震波的剪应变; (b) 输入 0.1 g El-Centro 地震波的反应谱; (c) 输入 0.4 g El-Centro 地震波的剪应变; (d) 输入 0.4 g El-Centro 地震波的反应谱

Fig. 10 Shear strain and response spectrum of inputting El-Centro wave in profile II-1

(a) shear strain of inputting 0.1 g El-Centro earthquake wave; (b) response spectrum of inputting 0.1 g El-Centro earthquake wave; (c) shear strain of inputting 0.4 g El-Centro earthquake wave; (d) response spectrum of inputting 0.4 g El-Centro earthquake wave

的计算结果经过若干次迭代已经收敛, 现称图 10c、d 中的结果为“收敛结果”。在两程序已经收敛的结果上, 用 SHAKE2000 再将其各自迭代一次, 称这次结果为“再迭代结果”。如果 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 内部计算方法相同, 那么 LSSRLI-1 的再迭代结果应该与 LSSRLI-1 的收敛结果相同或相近。实施这次“额外”迭代的具体做法如下: 将图 10c 中 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 的各层剪应变计算结果提取出来, 结合前文给出的土非线性曲线 (等效剪应变系数取 0.65), 可以插值获得对应两个程序中各土层的剪切模量与阻尼比, 见表 5。将这些模量与阻尼比当作初始参数都输入到 SHAKE2000 中进行 1 次迭代计算, LSSRLI-1 的再迭代计算流程见图 11。因为只有 1 次迭代, 所以剪应变计算结果只由各程序的剪应变计算方法决定, 排除了多次迭代带来的其他差异累积, 同样的还有反应谱的计算结果。剪应变、反应谱收敛、再迭代结果见图 12。

图 12 中的 LS 代表输入表 5 中 LSSRLI-1 收敛结果的  $G$ 、 $D$  列, 再用 SHAKE2000 进行 1 次计算的再迭代结果, 第一个 L 代表使用 LSSRLI-1 的

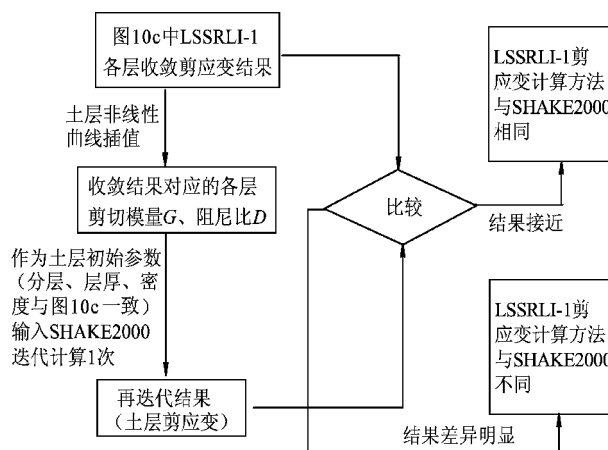


图 11 对 LSSRLI-1 收敛结果实施再迭代流程图

Fig. 11 Flow chart for re-iterate on convergence results of LSSRLI-1

收敛结果, 第二个 S 代表用 SHAKE2000 进行计算; L 代表图 10c、d 中 LSSRLI-1 收敛结果; SS、S 具有相似的意义, 代表 SHAKE2000 相关结果。 $d_s$  与  $d_{sl}$  代表剪应变与反应谱中 SS 与 S 的差距, 即 SHAKE2000 再迭代结果与其收敛结果的差距;  $d_L$  与  $d_{Ll}$  代表各图中 LS 与 L 的差距, 即 LSSRLI-1 再

迭代结果与其收敛结果的差距； $d_{LS}$ 与 $d_{LS1}$ 代表各图中 L 与 S 的差距，即图 10c、d 中 SHAKE2000 与 LSSRLI-1 收敛结果的差距。

在图 12a 中 SS 与 S 很接近，即  $d_s$  很小，这说明 SS 仅仅是在 S 本已收敛的结果基础上又迭代了一次；而 LS 与 L 有大的偏差，与  $d_s$  相比， $d_L$  很

大，这说明 SHAKE2000 程序与 LSSRLI-1 程序具有不同的剪应变计算方法。而从图 12b 中可以看到，SS 与 S 的反应谱很接近， $d_{s1}$  很小，而 LS 与 L 之间的距离则略大， $d_{L1} > d_{s1}$ 。SS 与 S 的反应谱也仅仅是多迭代一次而已，所以很接近；而 LS 与 L 反应谱有较小的差异，可能是由输入参数上存在

表 5 从各层的剪应变计算对应的剪切模量  $G$ 、阻尼比  $D$

Tab. 5 Shear modulus  $G$  and damping ratio  $D$  calculated by shear strain in every layers

程序名称	土层	剪应变	$G/G_{\max}$	$G_{\max}/\text{KPa}$	$G/\text{KPa}$	$D$
LSSRLI-1	1	$1.85 \times 10^{-4}$	0.957	65 600	62 779.2	0.024
	2	$6.60 \times 10^{-4}$	0.855	65 600	56 088.0	0.056
	3	$1.25 \times 10^{-3}$	0.739	65 600	48 478.4	0.073
	4	$1.97 \times 10^{-3}$	0.694	65 600	45 526.4	0.077
	5	$2.92 \times 10^{-3}$	0.636	65 600	41 721.6	0.082
	6	$4.18 \times 10^{-3}$	0.558	65 600	36 604.8	0.089
	7	$5.72 \times 10^{-3}$	0.375	65 600	24 600.0	0.105
	8	$7.48 \times 10^{-3}$	0.344	65 600	22 566.4	0.108
	9	$9.58 \times 10^{-3}$	0.307	65 600	20 139.2	0.111
	10	$1.17 \times 10^{-2}$	0.205	65 600	13 448.0	0.119
	11	$1.34 \times 10^{-2}$	0.205	65 600	13 448.0	0.119
	12	$1.44 \times 10^{-2}$	0.205	65 600	13 448.0	0.119
SHAKE2000	1	$1.37 \times 10^{-4}$	0.938	65 600	61 532.8	0.029
	2	$4.55 \times 10^{-4}$	0.845	65 600	55 432.0	0.056
	3	$8.45 \times 10^{-4}$	0.749	65 600	49 134.4	0.070
	4	$1.31 \times 10^{-4}$	0.656	65 600	43 033.6	0.080
	5	$1.88 \times 10^{-3}$	0.572	65 600	37 523.2	0.088
	6	$2.44 \times 10^{-3}$	0.509	65 600	33 390.4	0.093
	7	$2.89 \times 10^{-3}$	0.470	65 600	30 832.0	0.097
	8	$3.26 \times 10^{-3}$	0.441	65 600	28 929.6	0.099
	9	$3.43 \times 10^{-3}$	0.429	65 600	28 142.4	0.100
	10	$4.21 \times 10^{-3}$	0.381	65 600	24 993.6	0.105
	11	$4.99 \times 10^{-3}$	0.340	65 600	22 304.0	0.108
	12	$5.42 \times 10^{-3}$	0.324	65 600	21 254.4	0.109

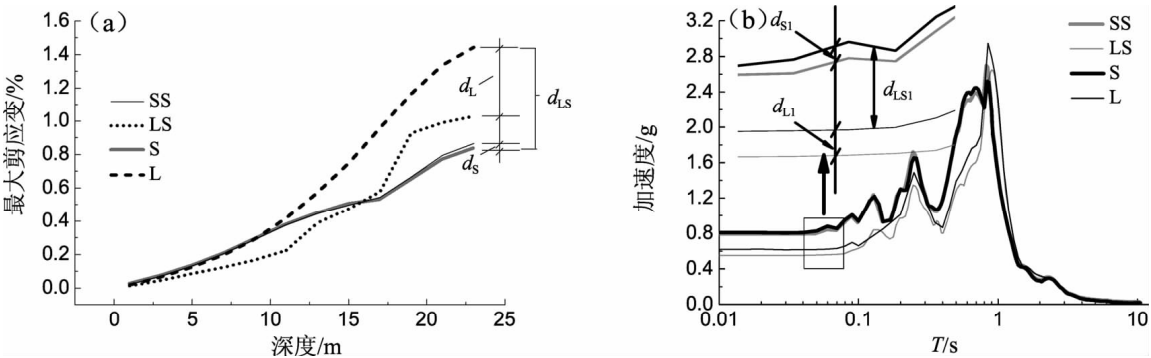


图 12 不同迭代次数下剪应变结果 (a) 和反应谱结果 (b) (剖面 II-1 输入 El Centro 地震波)

Fig. 12 Shear strain (a) and response spectrum results (b) under different iteration number (inputting El Centro wave in profile II-1)



的误差导致,也可能是反应谱计算方法存在不同,这些需要进一步研究。

从以上的对比可知,当剪应变不参与计算,即不依据剪应变来插值求得下一次计算所需各层土的剪切模量和阻尼比时,两程序计算结果并无太大差异,如图 12b 中 L 与 LS 两条线已非常相近。但剪应变参与到计算当中时,两方法所得到的地表反应就相差较大,如图 12b 中 S 与 L 两条反应谱。因而,可以初步推断,造成两程序间差异的主要原因是剪应变计算方法不同,当然,算法等方面也会有一些差异,但所带来的影响并不大。

### 3 结论

本文讨论了土为具有弱非线性硬场地(I类、II类场地)下采用 LSSRLI-1 与 SHAKE2000 计算土层地震动的异同性,主要结论为:

(1) I 类场地两个程序计算出的 PGA 十分接近,相对差变化范围不超过 1.4%,平均值为 0.6%;II 类场地两程序间平均相对差为 6.6%,可以忽略,但在某些情况下较大,达到 30%。

(2) I 类场地两个程序计算出的反应谱差别很小,谱值比均值是 0.3%,变化范围不超过 0.6%;II 类场地的反应谱存在差异,平均谱值比均值是 2.3%,变化范围是 0.2%~12.3%。

(3) 两个程序计算出的 I 类场地反应谱中,差异出现在 0.1 s 前,0.1 s 后差异很小;II 类场地反应谱的差异则从小于 0.1 s 延伸到 0.5 s 之后,且差异程度增大。

(4) 就两个程序计算出的最大剪应变而言,I 类场地相对差变化范围是 (0.7~9.0)%,均值为 4.4%;而 II 类场地的相对差则有明显增长,相

对差变化范围为 (0.7~300)%,均值为 46%。

(5) PGA 相对差和反应谱相对差与剪应变相对差之间存在一定相关性。

(6) LSSRLI-1 与 SHAKE2000 计算结果不同,一个主要原因在于剪应变计算方法的不同,其他的原因需要进一步对程序研究。

### 参考文献:

- 陈红娟. 2009. 土动力非线性的变异性及其对地震动影响的概率分析[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 景立平,卓旭场,王祥建. 2005. 复杂介质对地震波传播的影响[J]. 岩土工程学报,27(4):393-397.
- 李恒,张静波,吴建超. 2014. 软夹层和硬夹层对地表地震动特性的影响[J]. 地震工程学报,36(3):441-444.
- 李亚东. 2011. 区域性土的动力特性及对地下结构抗震分析的影响[D]. 广州:广州大学.
- 廖振鹏. 2003. 工程波动理论导论(第二版)[M]. 北京:科学出版社.
- 廖振鹏. 1989. 地震小区划理论与实践[M]. 北京:地震出版社.
- 刘红帅,薄景山,吴兆营,等. 2005. 土体参数对地表加速度峰值和反应谱的影响[J]. 地震研究,28(2):167-171.
- 齐文浩. 2004. 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.
- 齐文浩. 2008. 土层非线性地震反应分析方法研究[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 孙锐,袁晓铭,刘晓键. 2009. 动剪切模量比与剪切波速对地震动影响及等量关系研究[J]. 岩土工程学报,31(8):1267-1274.
- Haddadi H., Shakal A. 2006. Analysis of some strong ground motion records obtained at CSMIP downhole arrays[C]//France; Third International Symposium on the effect of Surface Geology on Seismic Motion, Grenoble.
- Schnabel P. B., Lysmer J., Seed H. B. 1972. SHAKE: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites[R]//Report NO. EERC 72-12. Berkely: College of Engineering, University of California.
- GB50011—2010, 建筑抗震设计规范[S].
- GB50021—2001, 岩土工程勘察规范[S].

## Comparison of Seismic Response on Weak Non-linear Stiff Sites Calculated by Two Calculation Programs

YU Xiao-bo, SUN Rui, YUAN Xiao-ming, CHEN Long-wei

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

### Abstract

The similarity and difference of soil ground motion in stiff sites of weak nonlinear which is calculated by two seismic respond programs of LSSRLI – 1 and SHAKE2000 is discussed. The tectonic soil profiles are composed by 2 class-I and 4 class-II sites, and the horizontal layered models are excited by three types of earthquake waves. Comparison and analysis results of PGAs, response spectrums, shear strains by two programs indicate that the PGAs are close in class-I site, and the relative deviations of PGAs can be neglected in sense of average, however they are big in some cases in class-II site. The response spectrums are little different in class-I sites, and that in class-II site are different, but the variation range are limited. The differences of shear strains are little in class-I sites, however, the range of different variations of them are large in class-II site. There exit correlations between the relative deviation of PGA, response spectrum and that of shear strain, and the inconsistent of PGA and response spectrum originates in the different shear strain calculation method by LSSRLI – 1 and SHAKE2000 programs.

**Key words:** LSSRLI – 1; SHAKE2000; relative deviation; spectrum ratio; seismic response analysis of soil