

基于 DEEPSOIL 的软土地地震反应研究¹

张 海¹⁾ 王 震¹⁾ 周泽辉¹⁾ 尤红兵²⁾

1) 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384

2) 中国地震灾害防御中心, 北京 100029

摘要 软土地地震反应分析是目前工程场地地震安全性评价中的重要组成部分,对场地设计地震动参数的确定具有重要意义。利用一维场地地震反应分析软件 DEEPSOIL, 可进行场地线性、等效线性化和时域非线性等多种分析,并可考虑孔隙水压的影响。笔者根据土层计算参数,编制了 DEEPSOIL 软件场地模型输入文件的自动生成程序,可高效、快速地完成对场地的建模。通过数值算例验证了 DEEPSOIL 软件的精度。同时通过对某典型 III 类软土地的地震反应分析,研究了拟合参数的敏感性以及等效线性化方法和时域非线性方法对峰值加速度和地表加速度反应谱的影响,并指出了等效线性化方法在分析软土地地震反应中的不足。对于软土地建议采用 DEEPSOIL 软件进行时域非线性分析,因为其参数简单并容易确定,适合建模快速和使用方便的要求。

关键词: DEEPSOIL 软件 等效线性化方法 时域非线性方法 软土地 地震反应

引言

软土地地震反应分析是目前工程场地地震安全性评价中的重要组成部分,对场地设计地震动参数的确定具有重要意义。软土地地震反应分析主要采用频域等效线性化方法和时域直接积分的非线性方法(胡聿贤, 2003)。目前,采用等效线性化方法的软件主要包括: Shake91 (Idriss 等, 1992)、EERA (Bardet 等, 2000)、LSSRLI-1 (廖振鹏等, 1989)、QUAD4-M (Hudson 等, 1994)、Flush (Lysmer, 1975) 等;采用时域非线性方法的软件主要包括: DEEPSOIL (Hashash 等, 2012)、NERA (Bardet 等, 2001)、DMOD2000 (Matasovic 等, 2007) 等。在我国工程场地地震安全性评价中,主要采用李小军等编写的一维等效线性化程序 LSSRLI-1。

由于等效线性化方法的局限性,在分析软土地时会出现不合理的现象,分析结果与非线性方法计算出的差别较大(李小军等, 2001; 杨伟林等, 2000; 齐文浩等, 2007; 荣棉水等, 2013);时域非线性模型要求的参数较多,参数的试验测定较复杂,因此,时域非线性方

1 基金项目 国家自然科学基金项目(编号 51248004);天津市应用基础与前沿技术研究计划(编号 13JCQNJC07400);天津市高校中青年骨干创新人才培养计划

[收稿日期] 2014-08-29

[作者简介] 张海,男,生于 1977 年。教授,博士。主要研究领域:工程波动理论、城市综合防灾减灾。E-mail: zhanghai@tju.edu.cn

[通讯作者] 尤红兵,男,生于 1970 年。研究员级高工。主要研究领域:地震工程。E-mail: hbyou@126.com

法的应用也受到了限制。而 DEEPSOIL 软件能够进行一维时域非线性和等效线性化分析,并可考虑孔隙水压的影响;同时,DEEPSOIL 软件可通过对等效线性化方法所需的土层非线性参数的拟合,直接得到时域非线性分析的参数,解决了时域非线性模型参数测定复杂的问题,促进了该软件的推广和应用。

本文简要介绍了 DEEPSOIL 软件的特点和主要理论方法,同时根据土层参数编制了 DEEPSOIL 软件场地模型输入文件的自动生成程序,以方便、快速建模。通过数值算例,对 DEEPSOIL 的精度进行了验证。并针对某典型 III 类软土地震反应,分析了拟合参数的敏感性,研究了等效线性化方法和时域非线性方法对峰值加速度和地表加速度反应谱的影响,指出了等效线性化方法在分析软土地震反应的不足,并提出了 DEEPSOIL 软件的使用建议。

1 DEEPSOIL 简介

DEEPSOIL 是美国伊利诺大学 Hashash 等 (2001a; 2001b) 开发的用于一维土层场地地震反应分析软件,包括线性、等效线性化和时域非线性等多种分析方法,并可考虑孔隙水压的影响。在 DEEPSOIL 的场地时域非线性地震反应分析中,土的本构关系采用了修正的双曲线本构模型 (Matasovic 等, 1993):

$$\tau = \frac{G_{mo}\gamma}{1 + \beta \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)^s} \quad (1)$$

式中: τ 为剪应力; γ 为剪应变; G_{mo} 为初始剪切模量; γ_r 为参考剪应变,与土的特性相关; β 、 s 分别为模型参数。其中参考剪应变 γ_r 由下式确定:

$$\gamma_r = \text{REF.strain} \left(\frac{\sigma_v}{\text{REF.stress}} \right)^b \quad (2)$$

式中, REF.strain 为特定围压下的参考有效应变; σ_v 为竖向有效应力; REF.stress 为参考压应力,一般取 0.18MPa; b 为拟合参数。

对小应变阻尼比的定义为:

$$\lambda = \text{Dampingratio} \left(\frac{1}{\sigma_v} \right)^d \quad (3)$$

式中, λ 为小应变阻尼比; Dampingratio、 d 为小应变阻尼比拟合参数。

上述模型可考虑深度对土非线性参数的影响 (Hashash 等, 2012); 当拟合参数 b 、 $d=0$ 时,转化为不考虑深度影响的双曲线本构模型。利用 DEEPSOIL 程序进行时域非线性分析时,除了土层的厚度、剪切波速、密度等参数外,其他需确定或拟合的参数如表 1 所示。

等效线性化方法所需的土层动力非线性参数为剪切模量比与剪应变关系曲线 $G/G_{\max}-\gamma$ 及阻尼比与剪应变关系曲线 $\lambda-\gamma$ 。DEEPSOIL 进行时域非线性分析时,可以通过对 $G/G_{\max}-\gamma$ 及 $\lambda-\gamma$ 进行拟合,获得表 1 中所需的参数。这是 DEEPSOIL 软件比其他软件更实用的重要特点。

表 1 DEEPSOIL 进行时域非线性分析时需拟合参数

Table 1 Fitting parameters of DEEPSOIL required for the time-domain nonlinear analysis

参数名称	Dampingratio	REF.stress	REF.strain	β	s	b	d
参数含义	小应变阻尼比 (%)	参考压应力	参考有效应变	拟合参数	拟合参数	拟合参数	拟合参数

DEEPSOIL 采用 MR、MRD、DC 三种非线性参数拟合方法。其中：MR 方法是只考虑对曲线 $G/G_{\max}-\gamma$ 进行最优拟合得出的计算参数；MRD 方法是对 $G/G_{\max}-\gamma$ 及 $\lambda-\gamma$ 曲线都进行拟合得出的计算参数；DC 方法是只考虑对 $\lambda-\gamma$ 曲线进行最优拟合得出的计算参数。

进行时域非线性分析时，土层厚度根据各土层允许地震波传播的最大频率 f_{\max} 确定：

$$f_{\max} = V_s / 4h \quad (4)$$

式中， V_s 为土层的剪切波速； h 为细分后土层的厚度。一般情况下，每一土层允许地震波传播的最大频率不得小于 25Hz。

2 输入文件的自动生成

利用 DEEPSOIL 软件建立场地模型时，采用交互式数据输入，包括细分后土层的厚度、剪切波速、密度及表 1 中所有参数。采用 MRD 等方法对 $G/G_{\max}-\gamma$ 及 $\lambda-\gamma$ 曲线进行拟合时，还需手动输入曲线的各个数据。当场地土层较厚、土类较多时，建立场地模型需大量时间，效率较低，这是 DEEPSOIL 软件的不足之处。

根据钻孔的柱状图、剪切波速测试结果及动三轴试验数据，笔者编制了场地模型输入文件自动生成程序。该程序主要包括以下功能：

(1) 根据剪切波速测试数据和给定的土层厚度，计算等效剪切波速。

(2) 根据土层的厚度、等效剪切波速、密度、动三轴试验数据等参数，自动生成工程场地地震安全性评价中推荐的等效线性化程序 LSSRLI-1 的输入文件 data2.dat。

(3) 当土层较厚时，程序可根据土层的剪切波速及输入地震波的优势周期或各土层允许地震波传播的最大频率 f_{\max} 自动进行细分。

(4) 根据细分后土层的厚度、等效剪切波速、密度、动三轴试验数据等参数，自动生成 DEEPSOIL 等效线性化分析的输入文件 EQL.dp。

(5) 调用 DEEPSOIL 中参数拟合程序 fitting.exe，可得到各类土的时域非线性计算参数，自动生成 DEEPSOIL 时域非线性分析的输入文件 Eonlin.dp。

该程序避免了在 DEEPSOIL 软件界面中手动输入大量数据，可高效、快速完成场地建模，生成不同的输入文件。场地土层越厚、土类越多，效果越明显。

3 DEEPSOIL 时域非线性程序验证

3.1 DEEPSOIL 与 NERA 结果比较

NERA 是利用中心差分法编制的场地时域非线性地震反应程序，土体采用了理想弹塑性 Iwan-Mroz (IM) 模型 (Bardet 等, 2001)。表 2 为 NERA 用户手册中算例的场地参数；图 1 为输入时程；图 3 为 $G/G_{\max}-\gamma$ 及 $\lambda-\gamma$ 曲线，其中土类 1、2 的 $G/G_{\max}-\gamma$ 曲线分别为 G1、G2，

λ - γ 曲线均为 $\lambda 1$ 。通过拟合可得到 DEEPSOIL 时域非线性参数, 图 4 给出了地表加速度反应谱的比较。从 DEEPSOIL 与 NERA 的时域结果可以看出, 两者的结果非常接近。但由于两个程序采用的本构模型及求解方法不同, 计算结果也略有差异。

表 2 NERA 场地计算参数

Table 2 Site parameters for NERA

序号	土类号	层厚/m	剪切波速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度 ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$)
1	2	1.5	304.8	2.00
2	2	4.5	274.32	2.00
3	2	3.0	289.56	2.00
4	1	6.0	304.8	2.00
5	1	6.0	335.28	2.00
6	2	6.0	396.24	2.09
7	2	6.0	426.72	2.09
8	2	6.0	457.2	2.09
9	2	3.0	487.68	2.09
10	2	3.0	548.64	2.09
基底			1219.2	2.25

表 3 Port Island 台站场地参数

Table 3 Site parameters of the Port Island station

序号	土类号	层厚/m	剪切波速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	密度/ $\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$
1	1	2.0	170	1.80
2	1	3.0	170	1.80
3	1	7.6	210	1.80
4	2	6.4	210	1.80
5	3	8.0	180	1.50
6	4	6.0	245	1.85
7	2	17.0	305	1.85
8	4	11.0	350	1.85
9	3	18.0	303	1.80
10	2	4.0	320	1.90

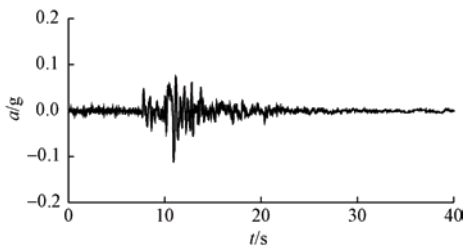


图 1 输入时程 (NERA)

Fig. 1 Input time history (NERA)

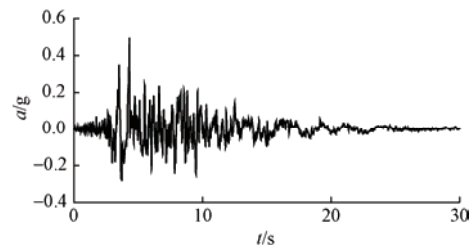


图 2 井下 83m 处地震记录

Fig. 2 Seismic record at depth of 83m

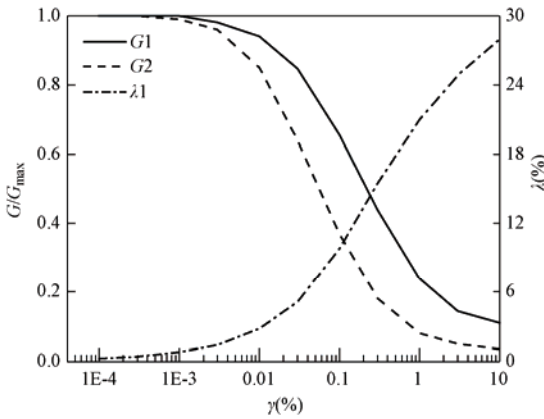


图 3 动力非线性参数

Fig. 3 Nonlinear dynamic parameters

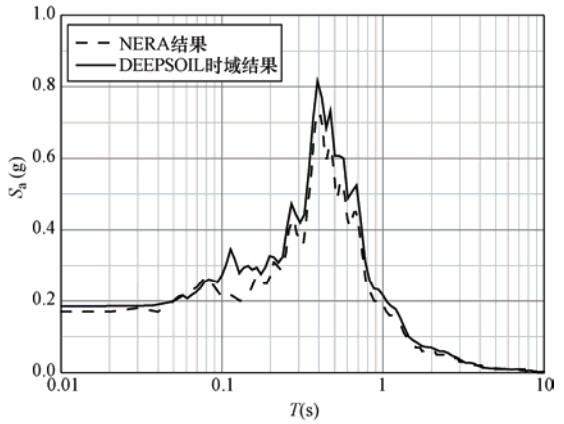


图 4 地表反应谱比较

Fig. 4 Comparison of surface response spectrum

3.2 DEEPSOIL 与 Port Island 台站记录比较

在 1995 年日本 Kobe 地震中，Port Island 台站获得了井下 83m 处及地表的加速度记录。采用井下 83m 处的加速度记录作为输入加速度历程，如图 2 所示。Port Island 台站场地的计算参数见表 3，图 5 为土层动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线。

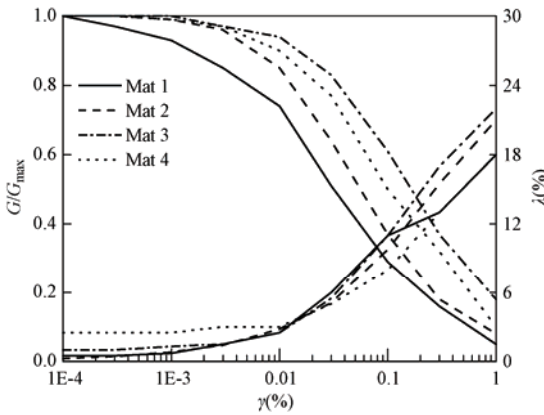


图 5 不同土的动力非线性参数

Fig. 5 Nonlinear dynamic parameters of different soils

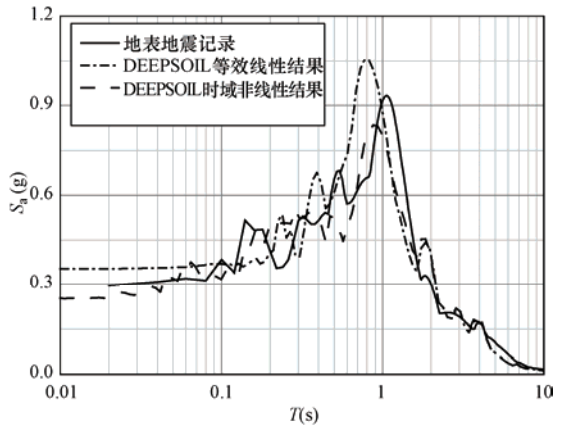


图 6 地表加速度反应谱比较

Fig. 6 Comparison of surface acceleration response spectrum

利用 DEEPSOIL 可进行等效线性化分析，同时通过对 $G/G_{max}-\gamma$ 及 $\lambda-\gamma$ 曲线的拟合可进行时域非线性分析。图 6 为笔者计算得到的地表加速度反应谱与地表记录加速度反应谱的比较。从中可以看出，DEEPSOIL 时域结果比等效线性化结果更接近实际记录的加速度反应谱。这说明通过对 $G/G_{max}-\gamma$ 及 $\lambda-\gamma$ 曲线的拟合，时域非线性分析方法具有较高的精度，是合理可行的。由于在地震中场地会发生液化，分析中还没有考虑孔隙水压的影响，这也造成了其与实际记录反应谱还有一定的差异。笔者将另文讨论利用 DEEPSOIL 考虑孔隙水压影响的相关分析。

4 算例分析

4.1 场地模型及输入时程

本文选取珠江口近海海域的大型跨海桥梁沿线工程场地的一个典型III类场地钻孔（荣棉水等，2013）作为算例。其场地参数见表4；输入地震时程见图7；不同概率水平的峰值加速度分别为0.054g、0.151g、0.261g；剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线见表5。使用DEEPSOIL软件分别建立了等效线性化场地模型及时域非线性模型。进行时域非线性分析时，各类土的参数通过MRD方法得到，如表6所示。

表4 场地的计算参数

Table 4 Physical parameters of the site

序号	土类号	土性描述	层厚/m	波速/(m·s ⁻¹)	密度/(t·m ⁻³)
1	1	淤泥	5	86	1.61
2	1	淤泥	6.8	101	1.61
3	4	粘土	2.5	150	1.91
4	2	粉质粘土	1.9	156	1.87
5	4	粘土	1.7	157	1.91
6	2	粉质粘土	7.2	241	1.87
7	5	砂砾	7.6	309	2.15
8	6	粗砂	1.9	297	2.15
9	3	粉粘混砂砾	15.6	300	1.83
10	7	强风化花岗岩	20.2	493	1.97
11	8	中风化花岗岩	8.6	737	2.10

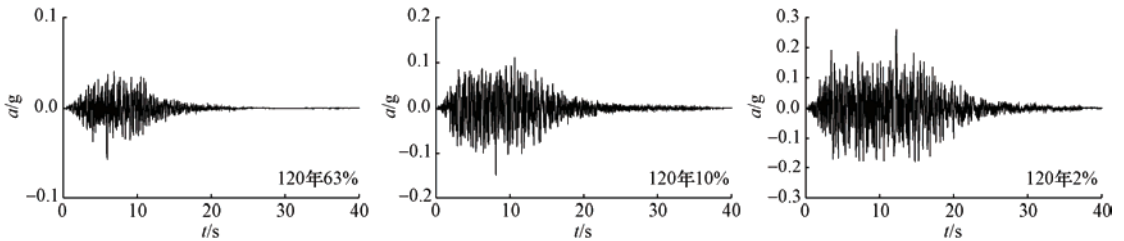


图7 输入时程

Fig. 7 Input time history

表5 各类土的剪切模量比、阻尼比与剪切应变的关系

Table 5 Relationship of shear strain of different soils to dynamic shear modulus ratio and damping ratio

序号		剪应变 (%)							
		0.0005	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1
1	G/G_{max}	0.991	0.979	0.897	0.812	0.462	0.300	0.079	0.041
	λ (%)	3.600	3.800	4.800	5.900	12.20	16.10	21.70	22.70
2	G/G_{max}	0.997	0.995	0.979	0.960	0.826	0.703	0.322	0.192
	λ (%)	2.800	3.500	6.100	7.800	12.80	15.40	20.60	21.90
3	G/G_{max}	0.997	0.995	0.976	0.954	0.804	0.673	0.292	0.171
	λ (%)	2.900	3.700	6.200	7.800	12.50	14.80	19.10	20.10
4	G/G_{max}	0.998	0.997	0.986	0.974	0.881	0.788	0.427	0.271
	λ (%)	3.100	3.900	6.300	7.800	12.30	14.70	19.90	21.40

续表

序号		剪应变 (%)							
		0.0005	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5	1
5	G/G_{\max}	0.993	0.985	0.924	0.858	0.544	0.374	0.107	0.056
	λ (%)	0.400	0.500	2.100	3.100	7.400	9.400	12.4	12.90
6	G/G_{\max}	0.994	0.989	0.946	0.898	0.639	0.469	0.150	0.081
	λ (%)	7.200	8.400	11.90	13.80	19.5	22.70	32.1	37.30
7	G/G_{\max}	0.997	0.995	0.974	0.949	0.790	0.652	0.273	0.158
	λ (%)	6.700	7.800	10.90	12.60	17.6	20.3	28.4	32.90
8	G/G_{\max}	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	λ (%)	0.800	1.000	1.500	2.100	3.000	3.600	4.600	5.400

表 6 时域非线性拟合参数

Table 6 Fitting parameters of time-domain nonlinear analysis

土类	Damping ratio/%	REF.stress/MPa	REF.strain	β	s	b	d
1	2.963	0.18	0.042	0.930	0.705	0	0
2	2.699	0.18	0.346	1.365	0.840	0	0
3	2.760	0.18	0.222	1.035	0.795	0	0
4	3.045	0.18	0.270	0.765	0.885	0	0
5	0.0268	0.18	0.074	1.035	0.615	0	0
6	6.997	0.18	0.097	1.080	0.870	0	0
7	6.608	0.18	0.196	1.050	0.900	0	0

4.2 拟合参数敏感性分析

基于表 5 给出的等效线性化参数，采用 MRD 方法拟合出时域非线性所需的土参数，并对拟合参数 Damping ratio、REF.strain、 β 、 s 分别进行敏感性分析。

以表 4 中的第 6 层土参数为例，利用 DEEPSOIL 建立单层土的场地模型，土层厚度 30m，波速 241m/s，基岩波速 500m/s，密度 2.1t/m^3 。按土层厚度要求划分模型，细化分子层厚设定为 2m。通过拟合可得到 Damping ratio、REF.strain、 β 、 s 等参数（表 6）；每次改变一个参数（增大 15%、减小 15%），其他参数不变。同时以图 7 中 120 年 2% 的时程作为输入地震动，分别对其进行时域非线性分析，计算每个拟合参数的敏感性，可得出地表反应谱的对比结果，如图 8—图 11 所示。增大 15% 或减小 15% 时，地表加速度反应谱与未增减相应结果的相对变化如图 12 所示。

从图中可以看出：Damping ratio、REF.strain、 β 、 s 等参数的变化对峰值加速度和地表加速度反应谱有一定的影响，但相对变化一般不超过 10%；峰值加速度的相对变化较小，一般不超过 3%。对于加速度反应谱，Damping ratio 的变化会造成 0.03—0.06s 的谱值变化超过 5%，最大为 10.9%；REF.strain 的变化会造成 0.03—0.8s 的谱值变化接近 5%，最大为 10.3%； β 的变化会造成 0.03—0.2s 的谱值变化超过 5%， β 减小 15% 时反应谱最大相差 12.98%； s 的变化会造成 0.03—0.4s 的谱值变化接近 5%， s 减小 15% 时反应谱最大相差 8.53%。上述 4 个参数中， β 的变化对地表加速度反应谱的影响最大。因此，利用 DEEPSOIL 进行时域非线性分析时，应注意这些参数的拟合，减小参数拟合对加速度反应谱的影响。

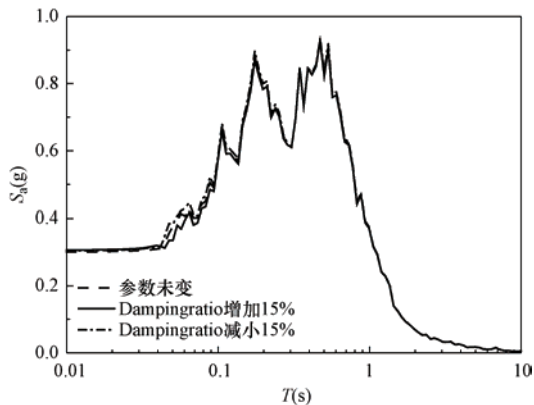


图 8 Damping ratio 变化对地表反应谱的影响
Fig. 8 The influence of damping ratio on surface response spectrum

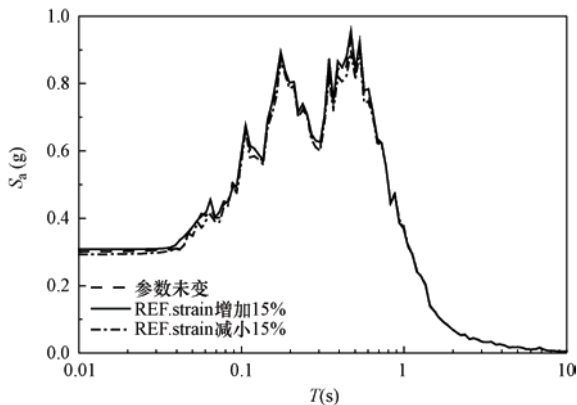


图 9 REF.strain 变化对地表反应谱的影响
Fig. 9 The influence of the REF.strain on surface response spectrum

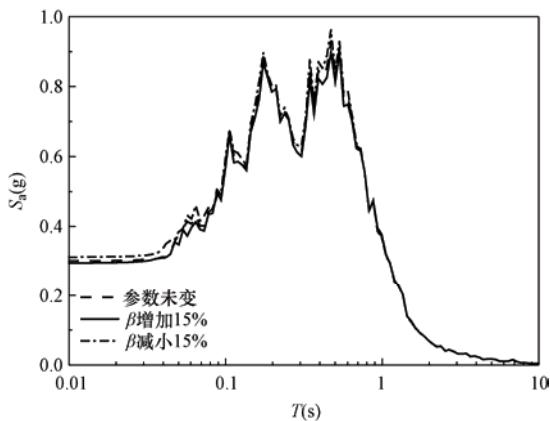


图 10 β 变化对地表反应谱的影响
Fig.10 The influence of β on surface response spectrum

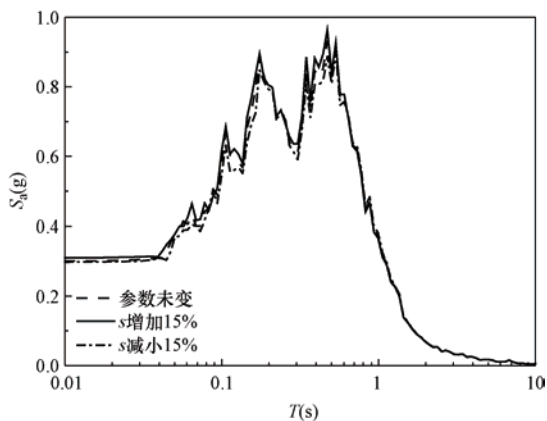


图 11 s 变化对地表反应谱的影响
Fig.11 The influence of s on surface response spectrum

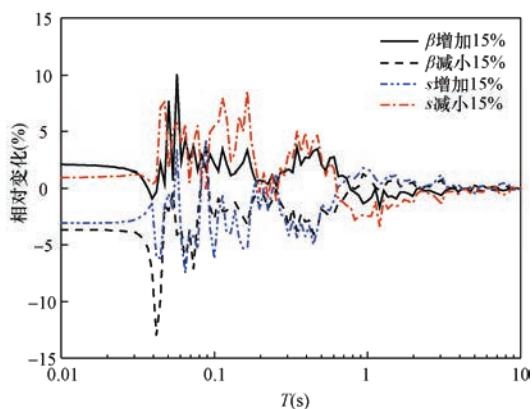
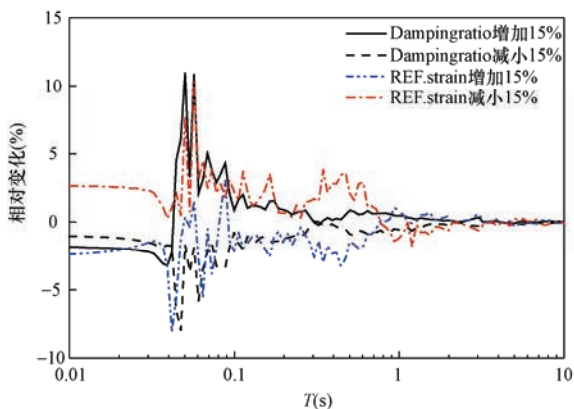


图 12 地表加速度反应谱的相对变化

Fig. 12 Relative changes of the surface acceleration response spectrum

4.3 分层厚度的影响

进行场地非线性地震反应分析时，土层的厚度对峰值加速度和反应谱有重要影响。土层的厚度一般根据各土层允许地震波传播的最大频率 f_{\max} 按式（4）确定。 f_{\max} 的取值与输入时程的最高截止频率或控制反应谱的最短周期相关。

为研究分层厚度对峰值加速度和反应谱的影响，笔者分别取 $f_{\max}=20\text{Hz}$ 、 30Hz 、 50Hz 、 70Hz ，并根据表 4 中的参数确定各土层的厚度，建立了相应的计算模型。以图 7 中 120 年 2% 的时程作为输入地震动，分别对时域非线性、峰值加速度随深度的变化、地表加速度反应谱进行了分析，结果如图 13 所示。由于各类土层厚度的限制，目前还无法保证细分后各土层允许地震波传播的最大频率均为 f_{\max} 。上述 4 种模型细分后，各土层允许地震波传播的最大频率范围分别为： $16.7\text{—}39.1\text{Hz}$ ($f_{\max}=20\text{Hz}$)、 $29.1\text{—}46.2\text{Hz}$ ($f_{\max}=30\text{Hz}$)、 $50.2\text{—}78.2\text{Hz}$ ($f_{\max}=50\text{Hz}$)、 $68.9\text{—}117.9\text{Hz}$ ($f_{\max}=70\text{Hz}$)。

从图 7 中可以看出， f_{\max} 选取不同值时，得到的峰值加速度和反应谱有所不同，这是由于输入时程的步长为 0.02s 及最高截止频率为 25Hz 造成的影响。当采用 $f_{\max}=20\text{Hz}$ 进行分层时，高于 16.7Hz 的地震波无法传播到地表，导致 $0.04\text{—}0.06\text{s}$ 的地表反应谱值明显低于其他模型的结果，因此，按 20Hz 进行分层是不合理的。

当 f_{\max} 高于 25Hz 时，各模型的结果基本一致，但在 $0.04\text{—}0.07\text{s}$ 的谱值有一定的差异。其原因可分为两方面：一是因为细分后各土层允许地震波传播的最大频率不同；二是接近粘土的淤泥层因厚度不同，所产生的非线性变形也不同，从而导致地表下 10m 附近的峰值加速度和反应谱高频部分的差异。

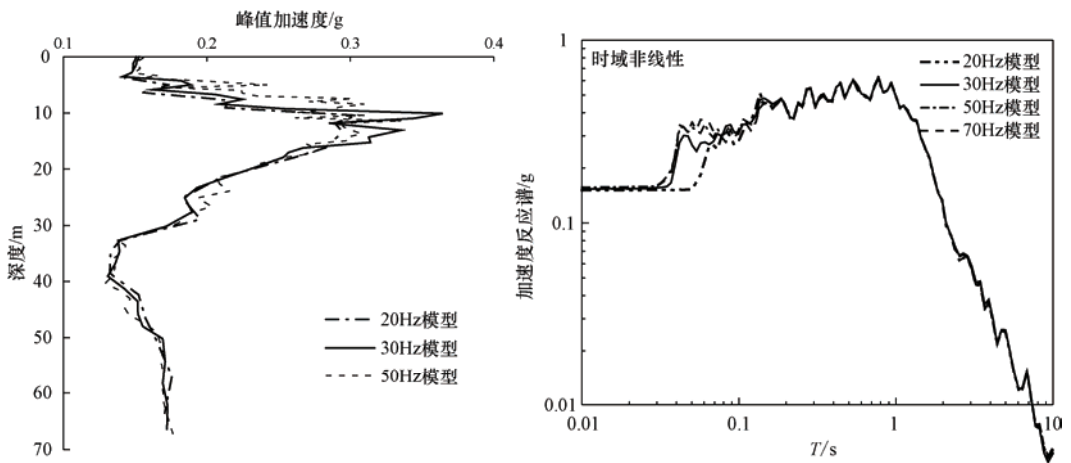


图 13 分层厚度对峰值加速度及地表加速度反应谱的影响

Fig. 13 The influence of layer thickness on peak acceleration and surface acceleration response spectrum

4.4 不同计算方法的对比分析

笔者根据 $f_{\max}=30\text{Hz}$ 确定的场地模型，以图 7 给出的不同超越概率水平的时程作为输入地震动，分别进行了等效线性化和时域非线性分析，峰值加速度随深度的变化及地表加速度反应谱如图 14 所示。同时图中还给出了利用中国地震局安评推荐软件得到的等效线性化结果。为方便进行比较，图 16 还给出了利用 DEEPSOIL 采用不同方法得到的地表加速度时程。

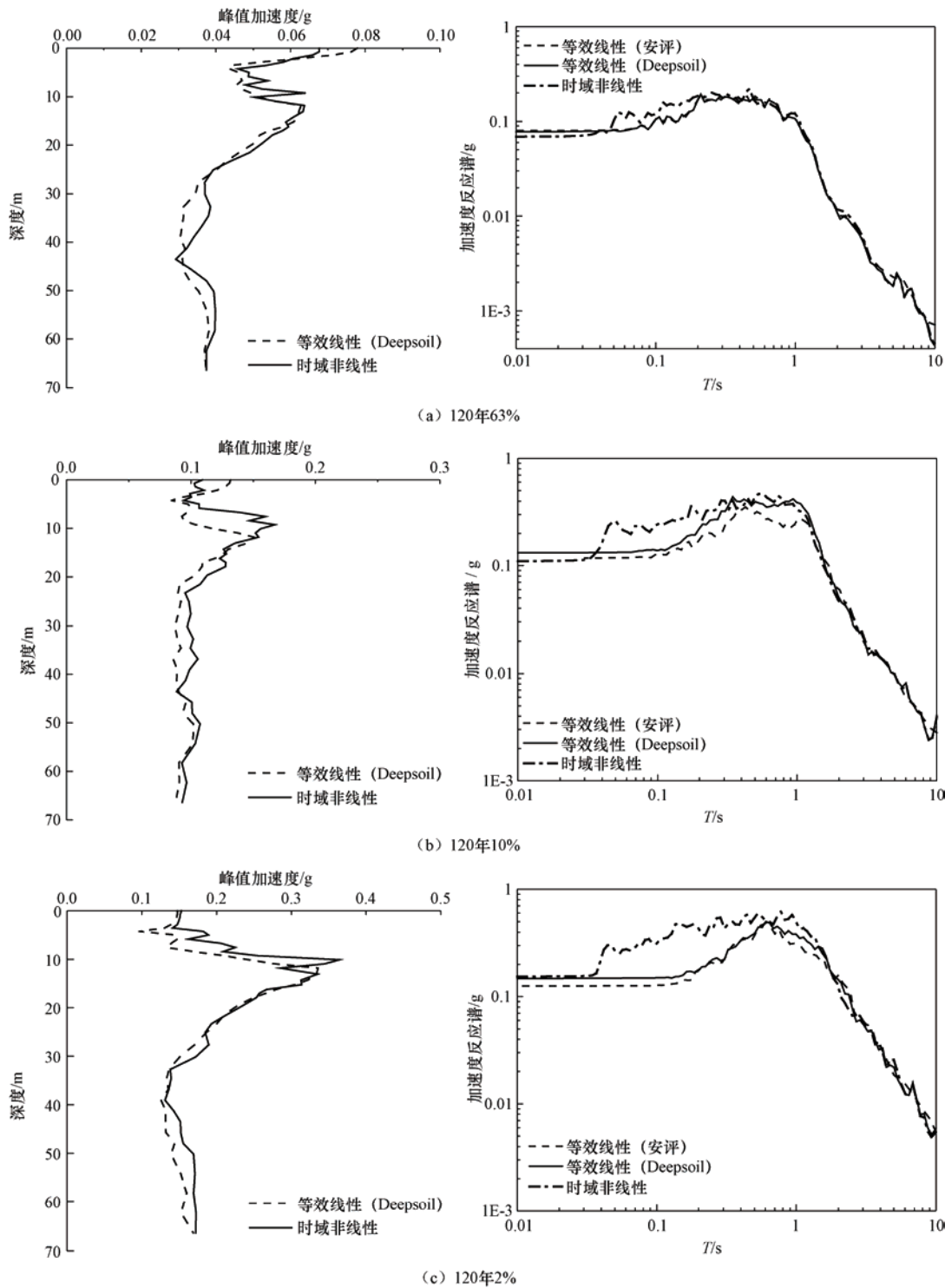


图 14 不同水平（120 年 63%、10%、2%）输入下峰值加速度随深度变化及地表加速度反应谱比较

Fig.14 Comparison of peak values of horizontal acceleration with depth and comparison of the surface acceleration response spectrum for different input time history

从图 14、图 16 中可以看出，对于软土地地，当输入峰值加速度较低时，采用等效线性化方法和时域非线性方法得到的结果相差较小；随着输入峰值加速度的增大，时域非线性方法与等效线性化方法得到的结果相差也越大。

在 120 年超越概率 2% 的情况下，安评软件得到的地表峰值加速度为 0.126g；采用 DEEPSOIL 时域非线性方法得到的地表峰值加速度为 0.154g，相差 1.22 倍。而等效线性化方法夸大了土层的非线性，导致计算出的地震动峰值偏小。

另外，采用两种方法得到的地表加速度反应谱在 0.04—0.7s 之间相差较大，尤其是在 120 年超越概率 2% 输入的情况下，其相差更大。图 15 分别给出了利用等效线性化方法和时域非线性方法得到的不同深度处，对输入时程频率的放大系数的比较。可以看出，用等效线性化方法得到的频率放大系数相当于用时域非线性方法得到的频率放大系数的平均值。两种方法得到的低频部分的放大系数基本一致，高频部分差别较大，因而导致地表中高频反应谱相差较大。

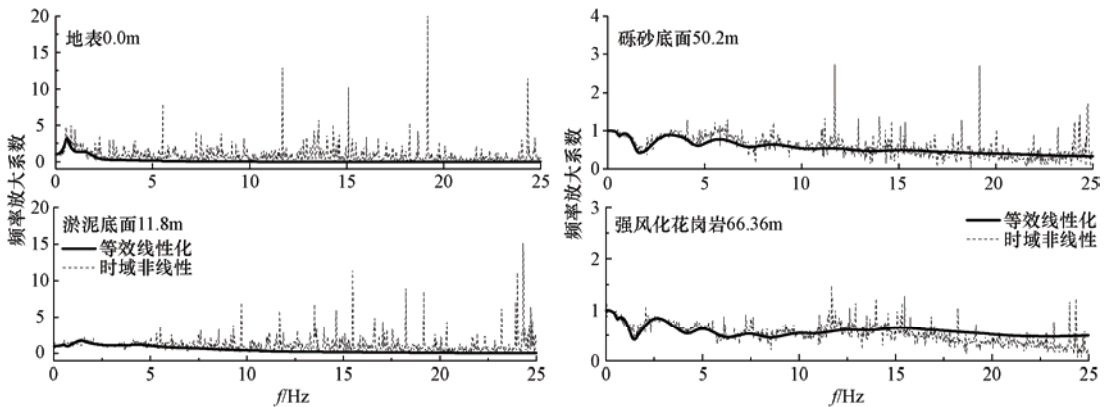


图 15 不同深度频率放大系数比较（120 年超越概率 2%）

Fig. 15 Comparison of frequency amplification coefficients at different depths (exceeding probability 2% in 120 years)

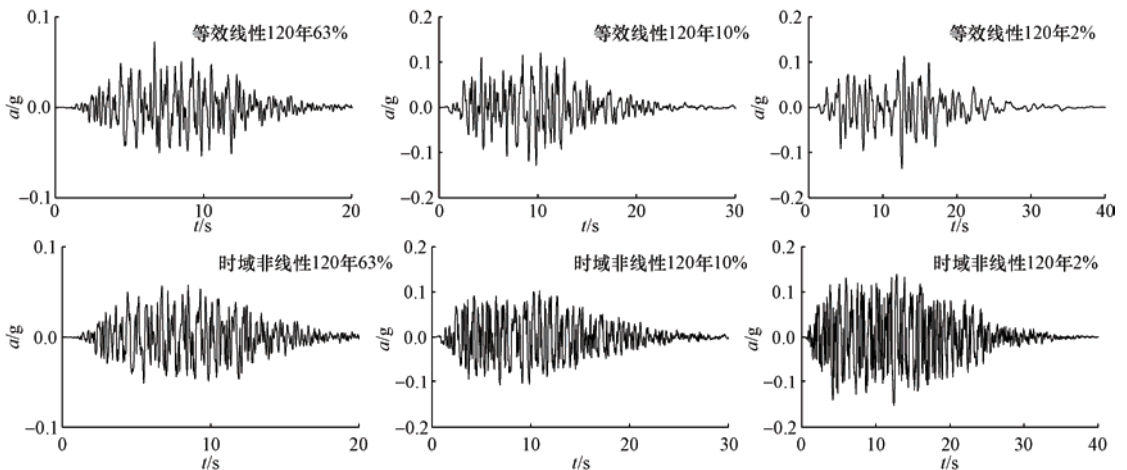


图 16 不同方法地表加速度时程比较

Fig. 16 Comparison of surface acceleration time history from different methods

图 17 给出了 120 年超越概率 10%、2% 输入下, 淤泥底层 11.8m 处的加速度反应谱。可以看出, 两种方法得到的结果基本一致。11.8m 的淤泥层对地表加速度反应谱有重要影响, 对于重要工程, 可考虑按去除淤泥层的计算结果确定设计地震动参数。

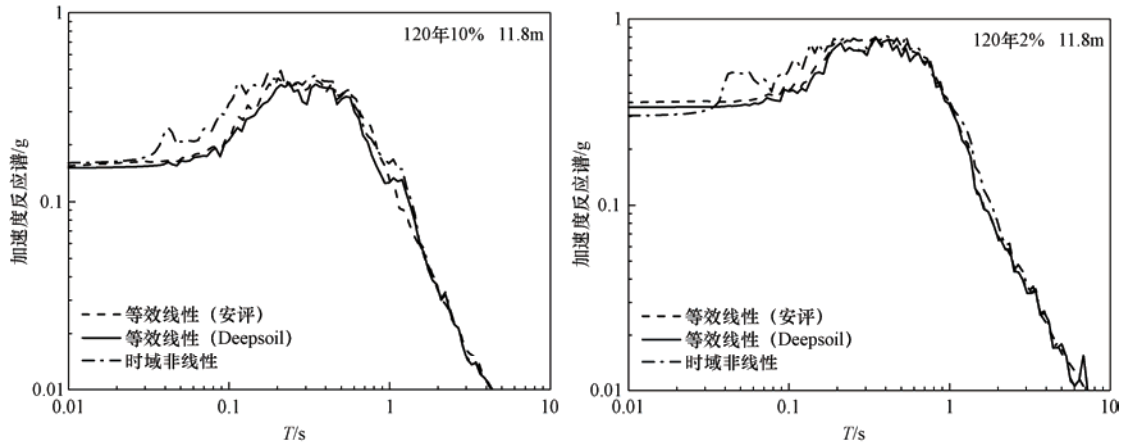


图 17 淤泥底层加速度反应谱比较 (120 年超越概率 10%、2%)

Fig. 17 Comparisons of acceleration response spectrum at the bottom of silt layer (exceeding probability 10% and 2% in 120 years)

5 结语

软土地地震反应分析是目前工程场地地震安全性评价中的难点之一, 对场地设计地震动参数的确定具有重要意义。本文利用 DEEPSOIL 软件研究了软土地的地震反应, 分析了等效线性化方法与时域非线性方法的差异, 并提出了使用建议。

(1) 根据土层计算参数编制的 DEEPSOIL 软件场地模型输入文件的自动生成程序, 可高效、快速地完成对场地的建模。

(2) 通过数值算例验证了 DEEPSOIL 软件具有较高的精度。DEEPSOIL 的时域结果与 NERA 的结果非常接近, 同时也与实际记录反应谱基本一致。

(3) 通过对某典型 III 类软土地的地震反应分析, 研究了拟合参数的敏感性以及等效线性化方法和时域非线性方法对峰值加速度和地表加速度反应谱的影响, 并指出了等效线性化方法在分析软土地地震反应中的不足。

(4) 对于软土地建议采用 DEEPSOIL 软件进行时域非线性分析, 因为其参数简单并容易确定, 适合建模快速和使用方便的要求。

参考文献

- 胡聿贤, 2003. 地震安全性评价技术教程. 北京: 地震出版社.
- 李小军, 彭青等, 2001. 不同类别场地地震动参数的计算分析. 地震工程与工程震动, **21** (1): 29—36.
- 廖振鹏, 李小军, 1989. 地表土层地震反应的等效线性化解法. 见: 地震小区划——理论与实践. 北京: 地震出版社.
- 齐文浩, 薄景山, 2007. 土层地震反应等效线性化方法综述. 世界地震工程, **23** (4) 221—226.

- 荣棉水, 李小军, 卢滔, 2013. 对含厚软表层海域工程场地设计地震动参数确定的一点建议. 地震学报, **35** (2): 262—271.
- 杨伟林, 陈国兴, 2000. 软土地基深开挖对场地设计地震动的影响. 地震工程与工程震动, **20** (3): 93—99.
- Bardet J.P., Ichii K., Lin C.H., 2000. EERA, A Computer Program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses of Layered Soil Deposits. Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Bardet J.P., Tobita T., 2001. NERA, A Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Hashash Y.M.A., Duhee Park, 2001a. Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment. Engineering Geology, **62** (1-3): 185—206.
- Hashash Y.M.A., Phillips C., Groholski D., 2001b. Recent advances in non-linear site response analysis. See: Fifth International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Paper no. OSP 4.
- Hashash Y.M.A., Groholski D.R., Phillips C.A., Park D., Musgrove M., 2012. DEEPSOIL5.1, User Manual and Tutorial. Department of Civil and Environmental Engineering University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Hudson M., Idriss I.M., Beikae M., 1994. QUAD4M: A Computer Program to Evaluate the Seismic Response of Soil Structures using Finite Element Procedures and Incorporating a Compliant Base, Center for Geotechnical Modeling, Dep. of Civil & Env. Engng, University of California, Davis.
- Idriss I.M., Sun J.I., 1992. SHAKE91: A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits. Department of Civil and Environmental Engineering, University of California Davis.
- Lysmer J., 1975. FLUSH: Seismic Soil-Structure Interaction Analysis. Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, Modified: N. Deng, San Francisco.
- Matasovic N., Vucetic M., 1993. Cyclic Characterization of Liquefiable Sands. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, **119** (11): 1805—1822.
- Matasovic N., Ordonez G.A., 2007. DMOD2000: A Computer Program Package for Seismic Response Analysis of Horizontally Layered Soil Deposits, Earthfill Dams, and Solid Waste Landfills. User'S Manual. GeoMotions, LLC.

The Study of Seismic Response in Soft Soil Site Based on DEEPSOIL

Zhang Hai¹⁾, Wang Zhen¹⁾, Zhou Zehui¹⁾ and You Hongbin²⁾

1) School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China

2) China Earthquake Disaster Prevention Center, Beijing 100029, China

Abstract The seismic response analysis of soft site is an important part of the current seismic safety evaluation of engineering site, and is of great significance for the determination of design ground motion parameters. One-dimensional site seismic response analysis software DEEPSOIL can be used for linear analysis, equivalent linear analysis and nonlinear time-domain analysis. The influence of the water pressure can also be considered when users need to. According to the calculated parameters of the soil, we compiled automatically generating procedures of the site model input file for DEEPSOIL software, and then the site model can be built efficiently and quickly. The precision of DEEPSOIL software was validated through numerical examples. For seismic response of a typical class III soft site, we analyzed the sensitivity of the fitting parameters. The influence of the equivalent linear analysis method and nonlinear time-domain analysis method on the peak accelerations and ground surface acceleration response spectrum is studied, and the shortage of the equivalent linear analysis method for seismic response of the soft site is pointed out. For soft site it is recommended to use DEEPSOIL software for the nonlinear time domain analysis, because of simple parameters, rapid modeling, and convenient to apply.

Key word: DEEPSOIL software; Equivalent linearization method; Time-domain nonlinear method; Soft site; Seismic response