

上海软土自由场地的三维地震响应分析

王国波¹, 杨林德²

(1. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要:建立了上海软土的三维动力分析模型, 其中基于上海典型软土土层动力试验数据, 建议采用 Davidenkov 模型描述上海软土的非线性动力特性, 研究了上海软土的地震响应规律。计算表明: (1) 从土体底部到表面, 地震波的高频成分减少, 低频成分增加; (2) 软土并非总是放大地震响应, 而取决于软土与地震波的特性; (3) 在进行自由场地震分析时, 将其简化为平面应变问题考虑是可行的; (4) 软土动剪切模量与动剪应变关系的计算曲线与试验曲线吻合较好, 表明采用本文推荐的模型考虑软土的非线性特性是合理的。本文的研究成果可为软土地区工程的抗震设计提供参考。

关键词: 上海软土; 自由场地; 地震响应; 三维计算模型

中图分类号: TU435 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2008)04-0326-06

3-D Seismic Response Analysis of Free-field Soft Soil in Shanghai

WANG Guo-bo¹, YANG Lin-de²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Three-dimensional calculation model of Shanghai soft soil is built, in which the Davidenkov model is proposed to describe non-linear dynamic characteristic of the soft soil based on the testing data. The rules of seismic response are studied. It is showed from calculation that: (1) the content of high frequency in seismic wave is decreased and low frequency part is increased from the bottom of the soft soil to its top; (2) the seismic response is not always been enlarged, its influence lies on the characters of soft soil and seismic waves; (3) it is feasible to simplify the seismic response analysis of free-field as plain strain problem; (4) the calculation curves and testing curves between dynamic shear modulus and dynamic shear strain are agree well with each other, which testified that it is rational to consider the non-linear characteristic of soft soil by the Davidenkov model. The study results can provide reference for engineering seismic design in soft soil area.

Key words: Soft soil in Shanghai; Free-field; Seismic response; 3-D calculation model

0 引言

场地条件对地下结构以及地基土的地震响应有明显的影响, 并直接影响到地下结构的受力状态、破坏模式以及地震灾害的分布与程度。了解自由场地土的地震响应规律是合理分析地下结构地震响应的基础和前提。因而, 自由场地土地震响应的研究也一直受到地震工作者的高度重视。较早详细研究场地条件对地震动影响的是美国人伍德(Wood), 他对

1906年大地震在旧金山地区内的震害进行了详细的现场调查, 发现了建在不同场地上的建筑震害差异很大; 在1923年日本关东大地震时, 人们调查发现建在软弱地基上的建筑物震害比建在坚硬基岩上的建筑物震害重好几倍。国内学者从上世纪60年代也开始了场地条件对地震动的影响研究, 60年代初周锡元在收集了国内外宏观震害资料的基础上, 得出了一些场地条件对地震影响规律^[1]。

收稿日期: 2008-03-14

作者简介: 王国波(1979-), 男(汉族), 博士后, 主要研究方向为地下结构抗震, 交通荷载引起的环境振动分析。

对于场地地震响应的分析,通常假定地震输入为竖直向上入射的平面剪切波,将问题简化为一维波动问题。Idriss 和 Seed^[2]等最早采用一维剪切梁模型求解剪切模量为常数的场地土及剪切模量沿深度按幂函数变化的场地土层的水平振动特性和地震反应。此后国内外许多研究人员在一维剪切梁模型基础上,对不同类型土层的动力特性和地震响应进行了研究。Wolf^[3]将土层简化模拟成截面积按指数函数随深度增大、符合材料力学原理的竖向杆件,研究了匀质自由场地土层的竖向振动;Davis^[4]与Zhao^[5]等人将剪切模量沿深度按幂函数分布场地土层等效成剪切模量沿深度按线性分布的场地土层,并对其进行了地面振动分析;石玉成^[6]系统地研究了场地地震反应分析中的不确定性及其产生的根源,利用蒙特卡洛法的有关理论,对影响场地地震反应分析结果的不确定性因素进行了估计与分析;奕茂田^[7]等以一维剪切梁模型为基础,给出了水平成层匀质场地自振特性与地震动力时域响应的解析表达式,其中包括了确定场地固有频率的特征方程、模态函数等;徐永林^[8]用2002年3月31日台湾 $M_s 7.5$ 地震时上海地区软土地表和基岩记录的加速度资料讨论了地表软土覆盖层面波的地震动反应,并用经验格林函数法合成了台湾未来8级大地震在上海基岩和土层处的面波加速度时程,初步估计了其对高层建筑的影响;郭晓^[9]等利用甘肃数字地震台网的波形记录,基于遗传算法,在此基础上用Moya方法同时反演了震源参数和场地响应。

上海市区表面土含有大量的软土,在地震动过程中对地震波的传播有很大的影响。本文拟先建立上海软土的三维数值计算模型,其中采用Davidenkov非线性弹性模型考虑上海软土的非线性特性,分析上海软土在上海人工波作用下的地震响应规律,了解上海软土的非线性特性,对自由场地地震响应的计算简化为平面问题的可行性进行论证,为软土地区地铁车站结构的三维地震响应分析奠定基础。

1 典型土层的动力试验^[10]

1.1 试验仪器与方法

采用C. K. C循环三轴仪和V. P. Drnevich共振柱仪测定了软土的动剪切模量 G_d 和阻尼比 λ 。C. K. C循环三轴仪属于单向激振循环三轴仪,简谐激振力频率为1 Hz,试样直径 D 、高度 H 为 $D39.1 \text{ mm} \times H80.0 \text{ mm}$ 。V. P. Drnevich共振柱仪属于一端固定,另一端自由(附集中质量块)类型的共振柱仪,

其试样尺寸为 $D35.7 \text{ mm} \times H71.1 \text{ mm}$ 。

对试样施加的有效围压取为试样实际承受的有效上覆压力。试样充分排水固结后,在V. P. Drnevich共振柱仪上逐级施加扭转激振力,得出动剪应变 γ_d 在 $10^{-6} \sim 10^{-3}$ 范围内的 $G_d - \gamma_d$ 和 $\lambda - \gamma_d$ 之间的关系曲线;在C. K. C循环三轴仪上对试样逐级施加轴向激振力,可得轴向动应变 ε_d 在 $10^{-5} \sim 10^{-2}$ 之间的动弹性模量 E_d 及 $E_d - \varepsilon_d$ 和 $\lambda - \varepsilon_d$ 的关系曲线,并进而得出 $G_d - \gamma_d$ 和 $\lambda - \gamma_d$ 的关系曲线。

1.2 试验结果

本次试验土样共有粉质粘土、粘土、粉土和砂土四种,各自的 $G_d - \gamma_d$ 和 $\lambda - \gamma_d$ 关系曲线,其中 G_d 为动剪切模量; λ 为动阻尼比; γ_d 为动剪应变。图1仅给出了粉质粘土的试验曲线。从图可看出,粉质粘土的动力变形特性符合“应变软化”规律即 G_d 随 γ_d 的增加而减小, λ 则随 γ_d 的增加而增加。

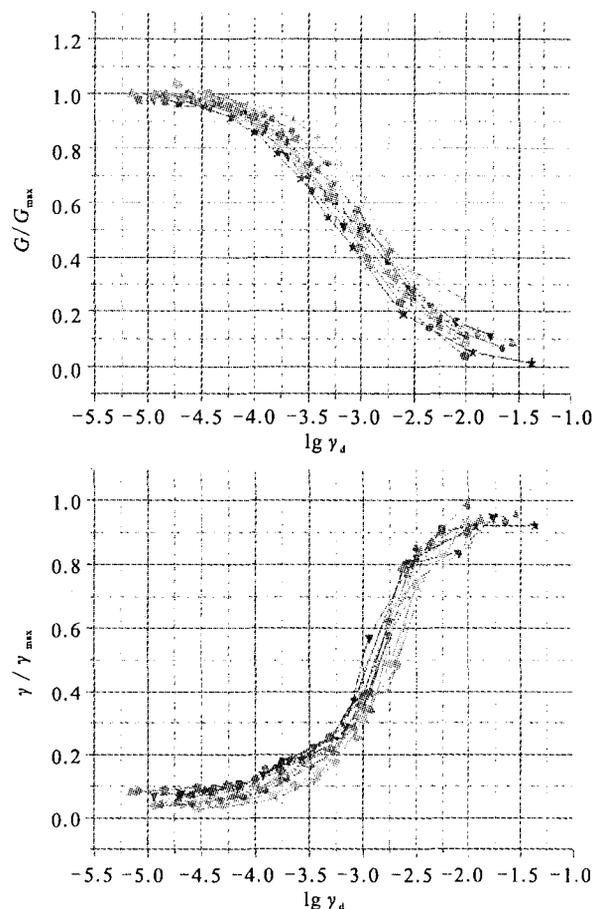


图1 粉质粘土动剪切模量与动应变关系的试验曲线

Fig. 1 Testing curves of the dynamic shear modulus and dynamic strain for silty clay.

1.3 结果分析

以往的试验研究表明,饱和软土的 G_d 与 γ_d 之间的关系基本符合双曲线关系。1963 年 Hardin 和 Drnevich 提出了 Hardin - Drnevich 模型^[11],随后 Seed 和 Martin 认为 Davidenkov 模型可更好地描述软土的动力变形特性^[12]。本项研究通过对试验数据的拟合分析,发现对于上海典型饱和软土, Davidenkov 模型也能很好地描述 G_d 、 λ 与 γ_d 之间的关系。

Davidenkov 模型可表达为

$$G_d/G_{max} = 1 - \left[\frac{(\gamma_d/\gamma_r)^{2B}}{1 + (\gamma_d/\gamma_r)^{2B}} \right]^A$$

$$\lambda/\lambda_{max} = 1 - G_d/G_{max}$$

其中 G_{max} 和 λ_{max} 为最大动剪切模量和最大动阻尼比; A 、 B 、 β 和 γ_0 为回归参数,其中 γ_0 为参考应变。当 $A = 1.0$, $B = 0.5$ 时, Davidenkov 模型便退化为 Hardin - Drnevich 模型。四种土的参数 A 、 B 、 β 和 γ_0 及其相关系数参见文献^[10]。

2 自由场地的三维地震响应

2.1 计算模型

2.1.1 计算范围

虽然此时土体中不存在结构,考虑到目前地下结构如地铁车站结构典型的横向宽度在 20 m 左右,据参考文献^[13]推荐的计算模型,本文将自由场计算范围取为:120 m(水平横向) × 210 m(水平纵向) × 70 m(土体厚度),采用实体单元离散土体。计算简图见图 2。

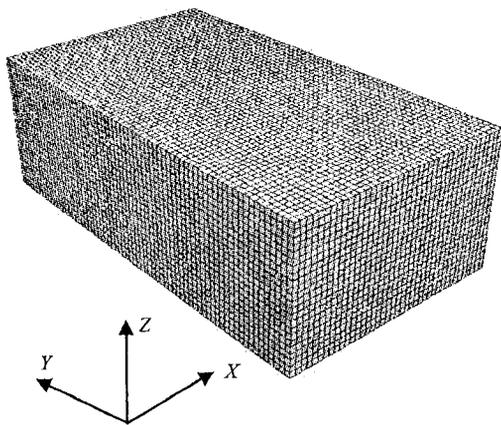


图 2 土体计算模型

Fig. 2 Soil calculation model.

2.1.2 本构模型及材料参数

静力计算时采用摩尔-库仑模型;动力计算时采用 Davidenkov 模型。作者基于 FLAC^{3D} 的二次开发

平台,成功实现了 Davidenkov 在 FLAC^{3D} 中的二次开发^[14]。本文选取德平路车站附近的土体为研究对象^[15],各土层参数见表 1。

2.1.3 边界条件

静力计算时土体四个侧面均固定相应的水平向位移,动力计算时土体四个侧面均采用自由场边界^[16],底部取为竖向固定、水平自由的边界,顶面为自由变形边界。

2.1.4 地震输入

在深度为 70 m 的基岩面上分别输入超越概率为 2%、10% 和 63% 的上海人工波,其中超越概率为 10% 的上海人工波的时程曲线如图 3 所示。

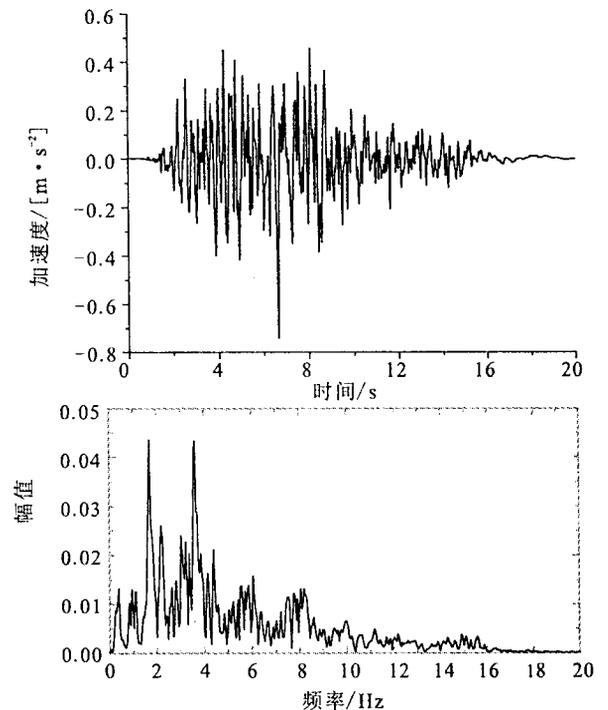


图 3 未来 50 年超越概率 10% 时地下 70 m 处上海人工地震波加速度时程及其傅氏谱曲线

Fig. 3 Acceleration time-history and its Fourier spectrum of Shanghai artificial wave with 10% exceed probability in 50 years at the depth of 70 m.

表 1 土层分布与其参数表

土层名称	层底埋深/m	重度 / $\times 10^3$ [kg · m ⁻³]	弹性模量 / $\times 10^6$ Pa	剪切波速 / [m · s ⁻¹]	泊松比
①2 暗浜填土	3.0	1.8	1.4	110	0.40
③ 褐黄色粘土	7.0	1.74	2.79	200	0.38
④ 灰色淤泥质粘土	15.0	1.7	1.98	180	0.35
⑤1 灰色粘土	24.0	1.77	3.71	240	0.30
⑤2 灰色粉质粘土	33.8	1.81	4.77	258	0.32
⑤3 灰绿色粘土	37.5	1.99	6.91	291	0.31
⑦ 草黄 - 灰色粉砂	70.0	1.96	1.49	362	0.28

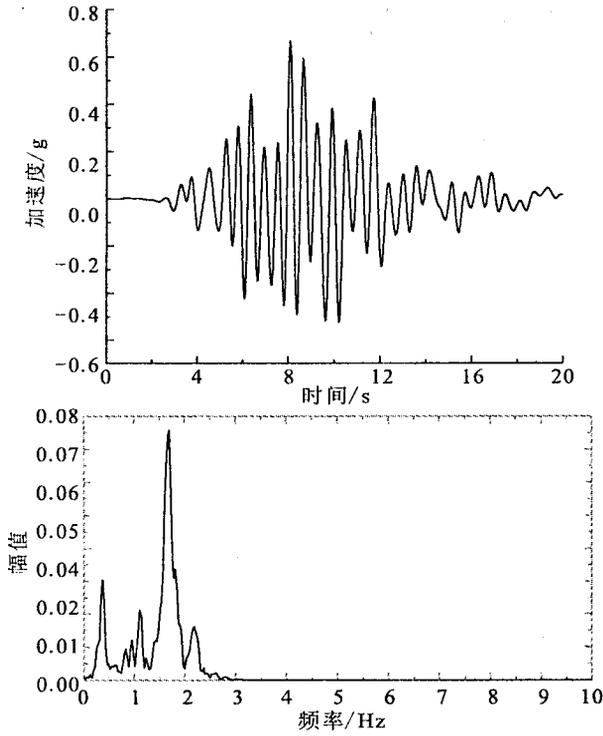


图4 超越概率10%时地震波作用下A点处的加速度时程曲线及其傅氏谱

Fig.4 Acceleration time history and its Fourier spectrum at point A with 10% exceed probability.

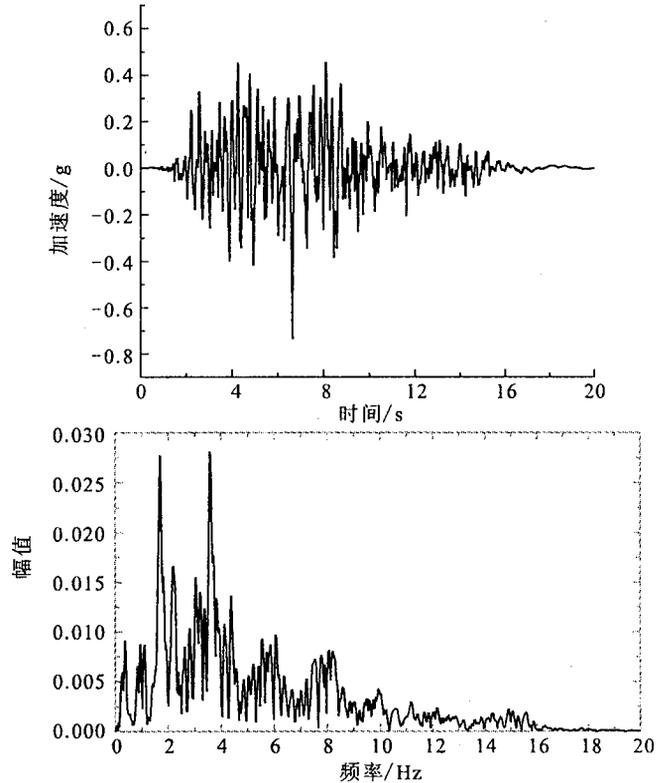


图6 超越概率10%时地震波作用下C点处的加速度时程曲线及其傅氏谱

Fig.6 Acceleration time history and its Fourier spectrum at point C with 10% exceed probability.

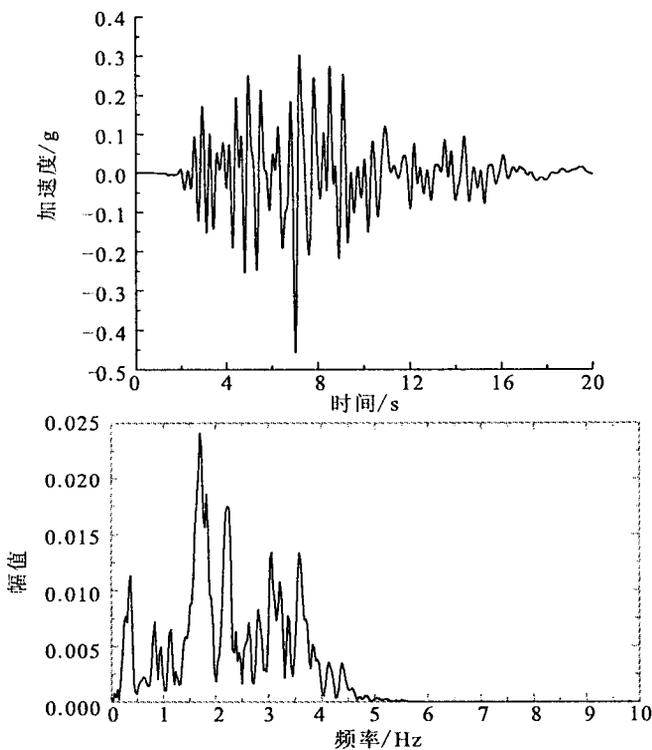


图5 超越概率10%时地震波作用下B点处的加速度时程曲线及其傅氏谱

Fig.5 Acceleration time history and its Fourier spectrum at point B with 10% exceed probability.

2.2 计算结果分析

2.2.1 加速度时程分析

图4—6分别为超越概率为10%的地震波作用下,土体纵向正中间横截面上($x=60\text{ m}$, $y=105\text{ m}$)底部A点($z=0\text{ m}$)、中部B点($z=35\text{ m}$)及表面C点($z=70\text{ m}$)处的加速度时程曲线及其傅氏谱。

由上面的曲线可知:

(1) 三种超越概率下土体加速度时程曲线的形状基本一致;

(2) 地震波在土体内部传播时,由于阻尼等因素,致使波的能量损耗,波速降低,土体的卓越周期延长,卓越频率降低,从傅氏谱上看就是卓越频率向左移动了。比较3条傅氏谱曲线可见:土体底部测点的傅氏谱存在明显的双峰,低频与高频均比较丰富,而表面测点几乎没有高频成分。

傅氏谱曲线体现了地震波在传播过程中的能量,上述分析表明土层表面的振动以低频为主,且能量较集中。因此对于软土地基地下结构或地面结构的抗震设计时必须注意软土的这一特性。

2.2.2 加速度放大系数分析

将土体内部不同深度处监测点的加速度峰值与土体底部地震动输入加速度峰值之比定义为加速度放大系数。三种不同超越概率地震波输入下,加速度放大系数与土体深度的关系如图7所示(在 $x = 60\text{ m}, y = 105\text{ m}$ 处)。

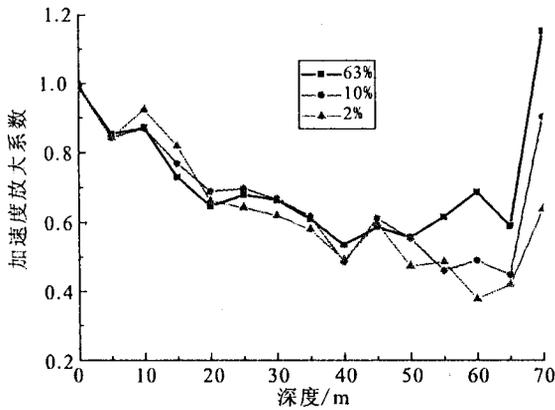


图7 不同超越概率下土体加速度放大系数与土体深度的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of acceleration amplification coefficient and soil depth under different exceed probabilities.

由图可见:

(1) 加速度峰值越大(超越概率为2%)时土体表面的加速度放大系数越小;加速度峰值越小(超越概率为63%)时,土体表面的加速度放大系数越大。这是因为软土在震动时体现出较强的非线性特性。

(2) 当地震较强时,土体动剪切模量衰减迅速,波在传播过程中能量大部分被土体吸收,致使土体表面的加速度放大系数小于1,即地震波衰减了。

(3) 当地震波较弱时,土体近似于弹性体,能量损耗少,同时地震波经各层土的表面反射与折射,致使土体表面的加速度放大系数大于1,即地震效应被放大了。

上述分析表明:软土并不总是放大地震效应,而与地震波及土体本身的特性有关。

2.2.3 土层表面加速度沿水平纵向的变化

定义线 $x = 60\text{ m}, z = 70\text{ m}$ 上各点的加速度幅值与点(60, 105, 70)处的加速度幅值的比值为相对加速度,其变化曲线如图8所示。

(1) 土体表面各点加速度幅值关于纵向正中间处对称分布,且正中间处加速度幅值最大,两端较小;

(2) 土体表面各点加速度的幅值在靠近模型边

界附近(30 m左右)变化较大,而在中间大部分区间内加速度幅值变化不大,表明在进行自由场抗震分析时,将其简化为平面应变问题考虑是可行的。

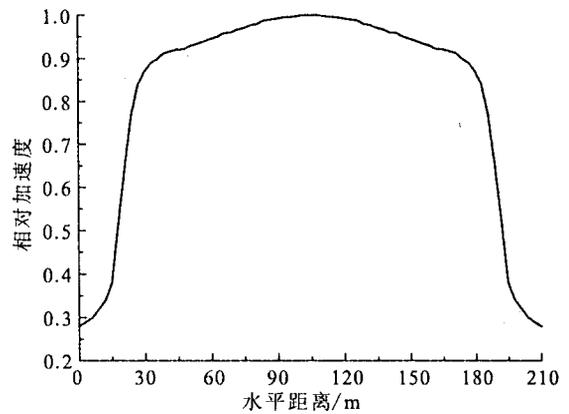


图8 土体表面各点相对加速度沿纵向的变化曲线

Fig. 8 Changing curve of the relative acceleration along longitudinal direction on soil surface.

2.2.4 土体非线性分析

图9为三种不同超越概率的地震波作用下深度为20 m处粉质粘土的动剪切模量与动剪应变之间的关系曲线。由图可见:

(1) 在剪应变幅值较小时,土体变化以线弹性为主,体现在三种幅值的地震波作用下的关系曲线基本一致;

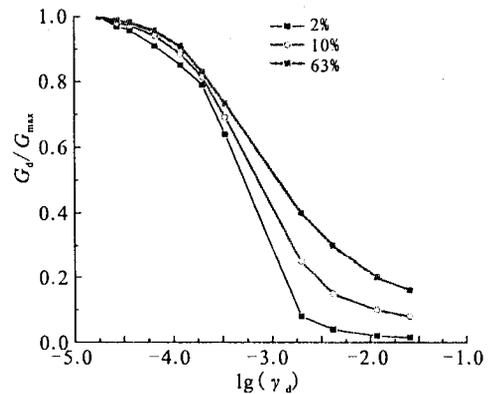


图9 不同超越概率下土体剪切模量与剪应变关系曲线

Fig. 9 Changing curves between soil dynamic shear modulus and its dynamic strain under different exceed probabilities.

(2) 当剪应变增加时,三者逐渐分离,地震波幅值越大,剪切模量衰减越迅速,土体非线性变形越显著,这与常理一致;

(3) 计算得到的曲线与试验曲线(图1)形状基

本一致,表明采用本文推荐的 Davidenkov 模型描述软土的非线性变形特性是合理的。

3 结语

本文建立了上海软土的三维数值计算模型,其中基于试验数据,推荐采用 Davidenkov 模型描述软土的非线性变形特性,研究了其地震响应规律,主要有:

(1) 土体底部测点的傅氏谱存在明显的双峰,低频与高频均比较丰富,而表面测点几乎没有高频成分,即土体有滤波作用;

(2) 软土并不总是放大地震效应,而与地震波及土体本身的特性有关;

(3) 将自由场地的地震响应计算简化为平面应变问题考虑是可行的;

(4) 采用本文推荐的 Davidenkov 模型描述软土的非线性变形特性是合理的。

本文的研究成果可为软土地区工程的抗震设计提供参考。

[参考文献]

- [1] 周锡元,王广军,苏经宇. 场地·地基·设计地震[M]. 北京:地震出版社,1991.
- [2] Idriss I M, Seed H B. Seismic response of horizontal soil layers[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,1968,94(4):100-103.
- [3] Wolf J P,著. 吴世明,译. 土-结构动力相互作用[M]. 北京:地震出版社,1989.
- [4] Davis R. Effects of weathering on site response[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics,1995,24(2):301-309.
- [5] Zhao J X. Estimating modal parameters for a simple soft - soil site having a linear distribution of shear wave velocity with depth[J]. Earthquake Engineering and Structure Dynamics,1996,25(2):163-178.
- [6] 石玉成,蔡红卫,徐晖平. 场地地震反应分析中的不确定性及其处理方法[J]. 西北地震学报,1999,21(3):242-247.
- [7] 奕茂田,刘占阁. 成层场地振动特性及地震反应简化解析的完整形式[J]. 岩土工程学报,2003,25(6):747-749.
- [8] 徐永林. 软土覆盖层地震面波的地震动反应及台湾8级地震对上海高层建筑影响的估计[J]. 西北地震学报,2004,26(4):309-314.
- [9] 郭晓,张元生,莘海亮,等. 祁连山中东段地区非弹性衰减系数-震源参数和场地响应研究[J]. 西北地震学报,2007,29(4):319-325.
- [10] 刘齐建. 软土地铁建筑结构抗震设计计算理论的研究[D]. 同济大学,2005.
- [11] Hardin B O, Richart F E. Elastic wave velocities in granular soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,1963,89(SM1):33-65.
- [12] Seed H B, Martin C R. The Seismic Coefficient in Earth Dam Design[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE,1966,92(SM3):25-58.
- [13] 王国波. 软土地铁车站结构三维地震响应计算理论与方法的研究[D]. 同济大学,2007.
- [14] 王国波,尹骥,杨林德,等. Davidenkov 模型在 FLAC3D 中的开发及验证[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(8):143-146.
- [15] 季倩倩. 地铁车站结构振动台模型试验研究[D]. 同济大学,2002.
- [16] Itasca Consulting Group. Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., 2002.