



UNIVERSITY
OF WOLLONGONG
AUSTRALIA

University of Wollongong
Research Online

Faculty of Engineering and Information Sciences -
Papers: Part A

Faculty of Engineering and Information Sciences

2011

Three-dimensional nonlinear analysis of seismic ground response of soft soils in Shanghai

Qingsheng Chen

Tongji University, qingshen@uow.edu.au

Guangyun Gao

Tongji University

Junfeng He

Tongji University

Publication Details

Chen, Q., Gao, G. & He, J. (2011). Three-dimensional nonlinear analysis of seismic ground response of soft soils in Shanghai. *Yantu Lixue*, 32 (11), 3461-3467.

Research Online is the open access institutional repository for the University of Wollongong. For further information contact the UOW Library:
research-pubs@uow.edu.au

Three-dimensional nonlinear analysis of seismic ground response of soft soils in Shanghai

Abstract

Reduced order bounding surface model was employed to study 3-D seismic ground response of site considering the nonlinearity of soft soils in Shanghai. A nonlinear procedure for response analysis of horizontal layered sites subjected to multidirectional earthquake loading was used to study vertical and horizontal ground responses, respectively, under unidirectional and multidirectional base excitations (Taft). Also, the development of ratio of vertical and horizontal peak acceleration and the effects of the variation of groundwater table on the characteristics of seismic responses were studied. The study results show that the characteristics of vertical seismic ground response are much different from those of horizontal seismic ground response; the amplification effect is greatly increased under multidirectional base excitations compared with that under unidirectional base excitations; greatly difference is induced by the rise of groundwater table between vertical and horizontal seismic response, as result of the rise of groundwater table, seismic amplification effect at ground surface increases in horizontal direction, but decreases in vertical direction, which are important for geotechnical engineering aseismic design in Shanghai region.

Keywords

shanghai, soils, soft, response, ground, three, seismic, dimensional, analysis, nonlinear

Disciplines

Engineering | Science and Technology Studies

Publication Details

Chen, Q., Gao, G. & He, J. (2011). Three-dimensional nonlinear analysis of seismic ground response of soft soils in Shanghai. *Yantu Lixue*, 32 (11), 3461-3467.

文章编号: 1000-7598 (2011) 11-3461-07

上海软土场地三维非线性地震反应分析

陈青生^{1,2}, 高广运^{1,2}, 何俊锋^{1,2}

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘 要: 考虑土的非线性, 采用弹塑性界面模型, 对上海软土场地进行三维地震反应分析。利用多维地震作用下的水平地层弹塑性动力反应分析程序, 以具有水平和垂直三向完整加速度记录的 Taft 波作为地震输入, 对比分析单向和多向地震输入场地水平和竖向地震反应特征, 并分析不同强度地震动输入下竖向和水平加速度峰值比特征及地下水位变化对场地土层地震反应特征的影响。计算分析表明, 竖向与水平向地震反应特征有较大差异; 与水平单向地震输入相比, 三向地震输入场地土层放大效应明显增大; 地下水位上升对水平向和竖向峰值加速度的放大效应影响差异显著, 地下水位上升, 地表水平峰值加速度放大效应增大, 竖向峰值加速度放大效应减小, 研究结果对上海地区的工程抗震设计具有参考作用。

关 键 词: 三维非线性; 地震反应分析; 简化界面模型; 多向地震输入

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Three-dimensional nonlinear analysis of seismic ground response of soft soils in Shanghai

CHEN Qing-sheng^{1,2}, GAO Guang-yun^{1,2}, HE Jun-feng^{1,2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092 China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092 China)

Abstract: Reduced order bounding surface model was employed to study 3-D seismic ground response of site considering the nonlinearity of soft soils in Shanghai. A nonlinear procedure for response analysis of horizontal layered sites subjected to multidirectional earthquake loading was used to study vertical and horizontal ground responses, respectively, under unidirectional and multidirectional base excitations (Taft). Also, the development of ratio of vertical and horizontal peak acceleration and the effects of the variation of groundwater table on the characteristics of seismic responses were studied. The study results show that the characteristics of vertical seismic ground response are much different from those of horizontal seismic ground response; the amplification effect is greatly increased under multidirectional base excitations compared with that under unidirectional base excitations; greatly difference is induced by the rise of groundwater table between vertical and horizontal seismic response, as result of the rise of groundwater table, seismic amplification effect at ground surface increases in horizontal direction, but decreases in vertical direction, which are important for geotechnical engineering aseismic design in Shanghai region.

Key words: 3-D nonlinearity; seismic ground response analysis; reduced order bounding surface model; multidirectional earthquake loading

1 引 言

大量的震害调查表明, 场地条件对地震作用下的地面运动有明显的影响, 尤其是场地土层对地震动具有放大效应。土层地震反应分析是估计场地条件对地震动响应的有效办法, 土层地震反应结果的可靠性直接关系到结构抗震设计有关地震动参数的正确选取。

由于地震动和土体非线性的复杂性, 当前国内工程土层地震反应分析方法主要采用 Seed 和廖振鹏等提出的单向等效线性化波动方法^[1-2], 将复杂的非线性问题简化为线性问题近似求解。然而, 土体是非线性很强的材料, 地震动越大, 土体的非线性越明显。在近几十年的工程实践中, 等效线性化简化分析方法暴露了许多不当之处。王志良^[3]、栾茂田^[4]、吴世明^[5]等指出, 等效线性化方法不能表

收稿日期: 2010-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 50538010, No. 50678128, No. 50878155); 上海市重点学科建设项目资助(No. B308)。

第一作者简介: 陈青生, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究工作。E-mail: chqsh2006@163.com

达土体非线性对地震反应的真实影响;李小军^[6]指出,等效线性化方法在计算软弱土层时与非线性方法差别较大;戚承志等^[7]指出,等效线性化方法的精度还存在许多问题,尤其在软厚土层条件下;Yoshida 等^[8]提到,当土层应变较大或地震动较大时,等效线性化方法算得的高频段频响放大率比实测结果明显偏低,且地面反应偏大。

此外,学者们普遍认为,与地震动水平分量相比,竖向分量很小,且结构本身竖向抗震能力较强,在研究土层地震反应时一般局限于单向水平震动条件下土层水平地震响应分析^[9-10],竖向地震响应分析却往往被忽略^[2],在抗震设计中常简单采用 1/2~2/3 的水平加速度峰值考虑竖向地震作用。然而,理论研究和震害经验表明,地震时的地面运动是复杂的多维运动^[11],竖向地震动有时非常强烈,造成建筑物的严重破坏。例如,1994 发生在美国加州圣费南多谷地的北岭地震中场地地震动竖向加速度峰值高达 1.19g (g 为重力加速度),且竖向加速度峰值与水平向加速度峰值比超过 1.5,远大于 2/3;1995 年日本阪神大地震正是一个以垂直方向分量为主的“直下型”地震;2008 年“5.12”汶川地震记录中,竖向地震动加速度峰值高达 0.633g。研究表明,场地地震反应分析中仅考虑水平地震动响应而忽略其他分量的影响是不合理的,有时甚至造成极大灾害。因此,土层竖向地震反应特征的研究也显得尤为重要。此外,文献[12]表明,场地地下水位变化对土层地震反应有着重要的影响,但地下水位变化对深厚软弱土场地地震反应特征的影响目前国内尚未见报道。

上海位于环太平洋地震带上,地处长江三角洲前缘,成陆较晚。地基土为深厚的第四纪饱和松散沉积物,多为滨海相沉积软弱土,覆盖软土层深度可达 280 m,在受到远震、大地震袭击时可能会发生严重的震害。近年来,上海及周边地区城市快速发展,地铁、海底隧道等设施大规模兴建,尤其是各种高耸建筑物(如电视塔)和高层结构的数量和高度不断增长,工程界对竖向地震动深入了解的愿望也更加迫切;同时,监测资料显示,上海地下水位变化整体呈上升态势,因而饱和深厚软弱覆盖土层的场地在地震作用下的地面运动问题也更加引起人们的关注。

为此,本文根据上海地区工程地质勘探和室内外试验建立场地计算模型,采用一种可考虑土的非线性的弹塑性界面模型,通过多维地震反应分析程序,计算分析三维地震荷载作用下上海典型深厚

软弱覆盖地层的水平和竖向地震反应特征及地下水位变化对场地放大效应的影响。

2 弹塑性界面模型

软土具有很强的非线性,尤其在地震荷载作用下软土的非线性变形特征更为明显,因此,对软土场地进行地震反应分析必须考虑软土变形特性。弹塑性界面模型是一个对于静力问题和动力问题、正常固结土和超固结土均适用的模型^[13]。界面理论取消了屈服面的概念,不需要大量的嵌套面来表达土的塑性关系,特别适用于周期荷载。

界面概念容许塑性变形以及与之相关联的材料硬化在一个界面逐步形成,如同屈服面一样,界面可以用一个单值函数^[14-17]表示:

$$F = F(\bar{\sigma}_{ij}, q_n) = 0 \quad (1)$$

式中: $\bar{\sigma}_{ij}$ 为一个虚应力,它为真实应力 σ_{ij} 的函数; q_n 为一组内部状态变量; F 为表示界面的单值函数。

塑性流动在界面理论中表示为

$$d\varepsilon_{ij}^p = L \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

式中: L 为荷载指数; ε_{ij}^p 为塑性应变。

$$\text{其中: } L = \frac{1}{K_p} \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}_{ij}} d\bar{\sigma}_{ij} \quad (3)$$

$$\bar{K}_p = -\frac{\partial F}{\partial q_n} \gamma_n \quad (4)$$

界面弹塑性刚度张量为

$$\mathbf{D}_{ijkl} = \mathbf{E}_{ijkl} - h(L) \left[\mathbf{E}_{ijml} \frac{\partial F}{\partial \sigma_{mn}} \right] \left[\frac{\partial F}{\partial \sigma_{pq}} \mathbf{E}_{pqkl} \right] \left[\frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}_{ab}} \mathbf{E}_{abcd} \frac{\partial F}{\partial \bar{\sigma}_{cd}} \right] + K_p \quad (5)$$

式中: $h(L)$ 为 Heaviside 函数。如果 $L > 0$, 则 $h(L) = 1$; 否则, $h(L) = 0$ 。

式(5)与一般的弹塑性刚度张量相比,形式一样。但在界面理论中,界面取代了屈服面,界面上的虚应力扮演经典塑性理论中屈服面上真实应力的角色,塑性模量 K_p 是真实应力及虚应力之间距离的函数。

3 场地资料和地震波的选用

3.1 土层剖面

本文地震反应计算深度达 280 m,考虑到计算的需要和现有资料,100 m 以上土层选用新建京沪高速铁路上海某站房的实际土层资料和试验结果,场地土层地质剖面参数参见表 1。其中参数主要包

括土层的重度、孔隙比、动弹性模量和剪切波速。场地 100 m 深度范围内的地基土属第四纪中更新世 Q₂ 至全新世 Q₄ 沉积物，主要由饱和黏性土、粉性土和砂土组成，具有水平层理。100 m 以下直至基岩土层根据上海软土地区典型地层现有资料参数^[10]近似处理。

3.2 试验和模型参数确定

弹塑性界面模型能较好地反映土体动力非线性

特征，但模型参数较多，结合现场和室内试验获取可靠的计算参数十分必要。本文计算参数主要通过现场检层法波速试验、扁铲侧胀试验、现场钻孔降水头注水试验及室内渗透试验等试验结果获得，参数主要包括渗透系数、静止侧向压力系数、剪切波速、动剪切模量、动弹性模量等，限于篇幅未一一列出。弹塑性界面模型参数的选取参见表 2。表中各参数意义详见文献[17]。

表 1 新建京沪高速铁路上海某站房主要土层参数
Table 1 Soil parameters for high speed railway station site, Shanghai

土层 层号	土层名称	层顶标高 /m	厚度 /m	重度 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	孔隙比	动弹性 模量 E_d /MPa	剪切波速 V_s /(m/s)
②	粉质黏土，可塑-软塑	0.00	1.80	18.53	0.892	57	101.30
③	淤泥质粉质黏土，流塑	1.80	3.60	17.63	1.130	77	119.60
④	淤泥质黏土，流塑	5.40	6.40	16.67	1.457	92	134.30
⑤ ₁	黏土，局部夹薄层粉砂，软塑-流塑	11.80	6.50	17.50	1.155	155	170.40
⑤ ₂	粉质黏土，夹薄层粉砂，软塑-流塑	18.30	5.80	18.00	1.012	218	200.40
⑤ ₃	粉质黏土，可塑-软塑	24.10	9.20	18.07	0.967	323	249.30
⑤ ₄	粉质黏土，局部夹薄层粉性土，硬塑-可塑	33.30	4.60	19.50	0.696	406	262.10
⑥	粉质黏土，局部夹薄层粉性土，硬塑-可塑	37.90	3.20	19.27	0.723	488	289.30
⑦ ₁	粉砂夹砂质黏土，夹薄层黏性土、粉质黏土及少量细砂，中密-密实	41.10	5.60	19.00	0.753	453	279.80
⑦ ₂	粉细砂，密实	46.70	8.60	18.83	0.794	660	349.30
⑧ ₁	粉质黏土，可塑-软塑	55.30	11.30	19.10	0.810	589	318.40
⑧ ₂	粉质黏土、粉砂互层，	66.60	8.20	19.17	0.793	811	376.40
⑨	粉细砂夹中粗砂，密实	74.80	21.80	19.00	0.754	985	417.90
⑩	粉质黏土，灰色	96.60	未钻穿	19.80	0.716	967	434.50

表 2 土层塑性界面模型参数
Table 2 Parameters for reduced order bounding surface model

土性参数	$\varphi / (^\circ)$	G_0	λ	k	h_r	d	R_p/R_f	K_r	b	h_p
粉质黏土	24	130.0	0.025 0	0.001 50	0.763	100.0	0.75	1.2	2	35
淤泥质黏土	13	75.7	0.005 0	0.004 20	0.763	100.0	1.00	100.0	2	35
粉细砂	35	190.0	0.019 0	0.001 60	0.294	1.0	0.75	0.4	2	35
中粗砂	40	364.0	0.009 7	0.001 94	0.175	0.1	0.75	0.3	2	35

3.3 基岩地震动输入

1987 年，同济大学在上海市和世界银行支持下，虽然已经建立了上海地区强震观测台网，但至今尚未取得有工程意义的强震记录，因此，在进行地震反应分析时需要参考国内外其他地区现有的地震资料。Taft 地震波曲线具有完整的南偏东 69° (H1)，北偏东 21° (H2)，竖向 (V) 3 个方向加速度-时程记录 (见图 1)，因此，这组地震波曲线对研究多维地震作用具有一定意义。为考虑不同地震动强度作用下场地土地震动效应，在计算过程中将 Taft 地震波 3 个方向加速度-时程分别按 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 比例缩小，并分别记为 L1、L2、L3、L4、L5 不同峰值水平的地震动输入。

4 地震反应特征分析结果

4.1 三向地震动作用水平和竖向加速度放大特性

图 2 为三向地震输入 (L3) 时地震反应的地表水平和竖向加速度-时程曲线。由前述可知，L3 地震输入为 Taft 地震波各分量按 0.3 比例缩小而得，水平向加速度峰值分别为 0.052 5g、0.048 0g，竖向加速度峰值为 0.034 0g。对比分析图 1、2 可知，水平向峰值加速度放大了约 1.7 倍，高频成分明显降低，低频成分放大，长周期成分突出，呈现出低频长周期特征，软弱土层对水平地震波的滤波和放大作用将对自振周期较长的构筑物 and 高层建筑物影响较为明显。竖向峰值加速度放大了约 1.8 倍，但与

水平加速度不同, 竖向加速度频谱特征变化相对不明显。

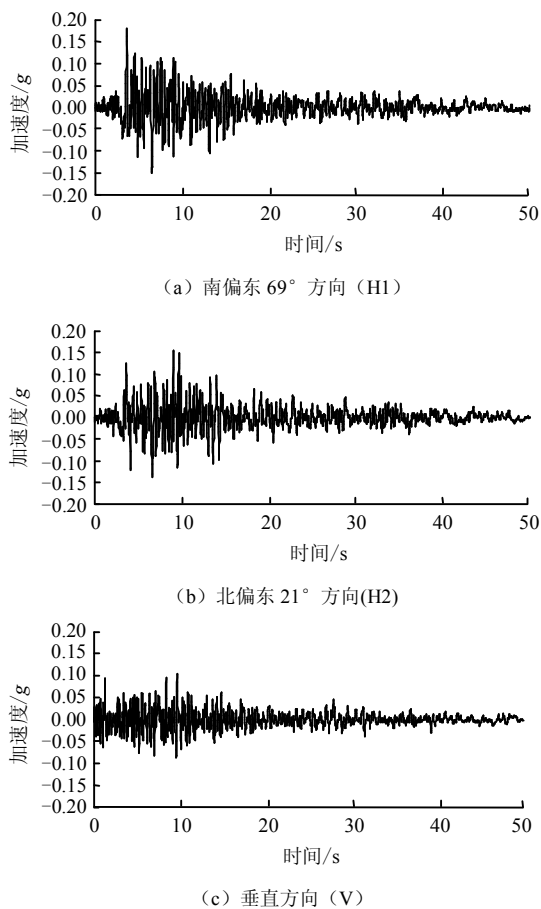


图1 Taft波加速度-时程曲线

Fig.1 Time histories of acceleration (Taft)

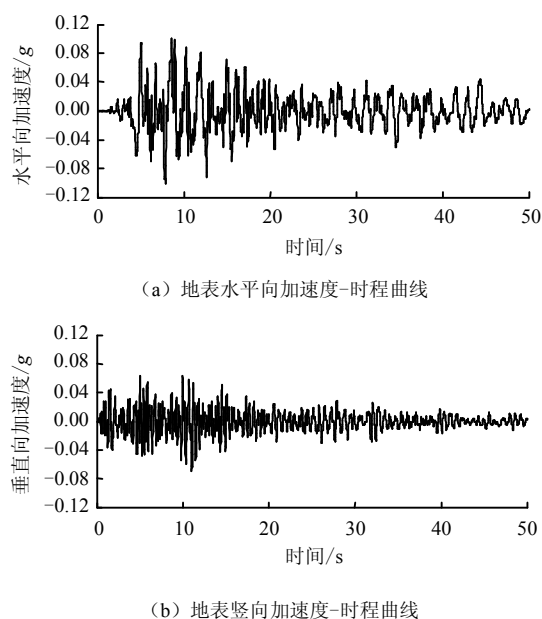


图2 三向地震输入场地地表加速度-时程曲线

Fig.2 Time histories of acceleration on ground surface subjected to 3-D earthquake loading

4.2 不同维数、不同强度地震动作用水平向峰值加速度放大特性

场地在不同维数、不同峰值加速度水平作用下的土层水平峰值加速度放大系数随深度变化曲线, 如图3所示, 这里只显示50 m土层深度范围内的计算结果。所谓放大系数是指不同深度处地震动加速度峰值与基岩处地震动输入加速度峰值之比。从图中可以看出, 土层的水平加速度放大系数随着土层分布和土层条件的不同而不同, 而且基岩输入地震加速度峰值不同, 土层的地震反应也存在规律性的变化。如图3(c)所示, 土层水平加速度放大系数随着输入地震动峰值加速度的增大而不断减小, 其变化范围大约在2.35~1.40之间, 这是由于输入地震动加速度峰值的增大, 土体剪应变水平增大、剪切模量减小所引起的。另外, 水平加速度放大效应随着场地土层不同深度处也有所差异, 浅层淤泥质软弱土层水平加速度放大效应较为显著, 深部土层水平加速度放大效应相对较为平缓。对比分析图3(a)~3(c)还可以发现, 多向地震动输入条件下水平加速度放大效应明显较大, 比较三向地震输入与单向地震输入作用下场地土层水平加速度放大系数, 其放大效应提高了12%~16%。可见, 场地土层地震响应分析只考虑单向地震动输入是远远不够的, 若忽视其他方向地震动输入影响, 有时将可能造成严重灾害。

4.3 多向地震输入不同强度地震动作用竖向加速度放大特性

图4为三向地震输入且不同强度地震作用下竖向峰值加速度放大系数随土层深度的变化曲线, 这里只显示50 m土层深度范围内的计算结果。从图中可以发现, 与水平向地震响应分析相比, 土层的竖向地震反应规律存在较大的差异。图4(c)为场地土层竖向加速度放大系数随深度的变化曲线, 可以看出, 竖向加速度放大系数随着输入地震动加速度峰值的增大而增大, 这一特征与水平地震响应截然相反, 且变化趋势比较平滑, 这说明在土层饱和和状态下竖向加速度放大效应受土层分布影响较小; 另外, 在整个土层深度范围内, 放大系数均在1以上, 即场地各土层对地震波竖向分量均呈放大作用。图4(a)、4(b)为地震波水平分量引起的场地土层竖向地震响应, 放大系数较大, 但由于绝对加速度峰值较小, 放大系数随着深度变化局部有微小的波动, 但整体响应规律与图4(c)三向地震动共同作用时的响应规律基本一致。

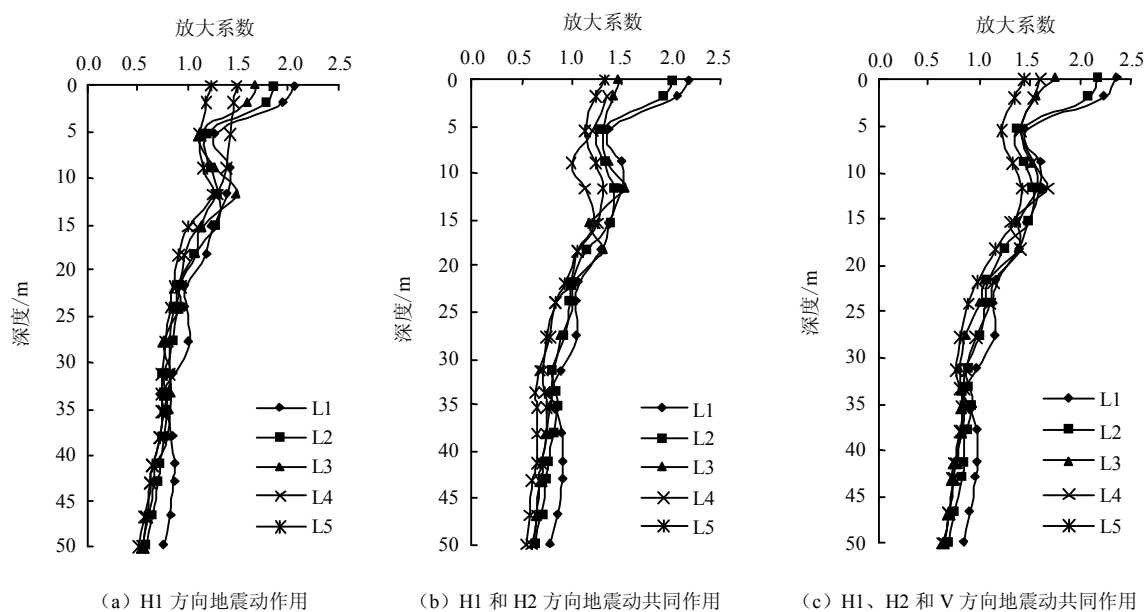


图 3 水平峰值加速度放大系数随土层深度的变化 (50 m)
 Fig.3 Horizontal acceleration amplification factors with the depth (50 m)

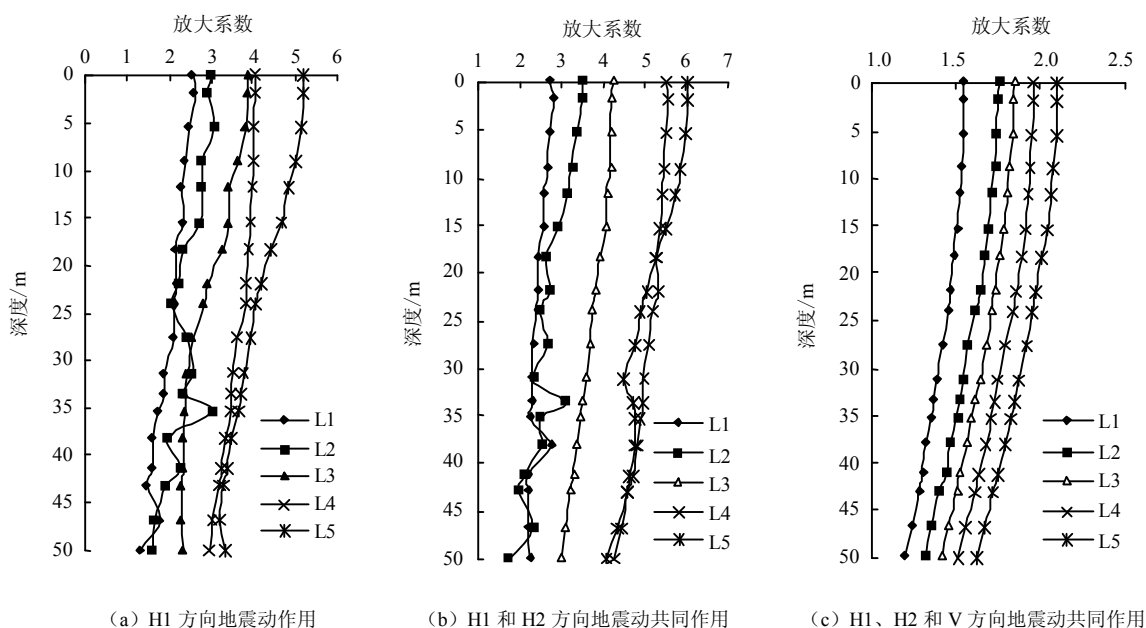


图 4 竖向峰值加速度放大系数随土层深度的变化 (50 m)
 Fig.4 Vertical acceleration amplification factors with the depth (50 m)

4.4 三向地震动作用水平和竖向加速度峰值比

早期研究认为，各类场地竖向和水平向的平均反应谱形状相差不大，一直到现在，大部分抗震设计规范仍然采用水平反应谱乘以 1 个系数的方法来计算竖向地震作用，这个系数一般在 1/2~2/3 之间。我国现行的《建筑抗震设计规范》规定^[18]，竖向地震影响系数最大值可取水平地震影响系数最大值的 0.650。然而研究表明，竖向反应谱与水平反应谱的

比值和震中距、场地类型和反应谱周期都有密切关系。限于篇幅，本文仅考虑不同强度地震动输入时上海深厚软弱土场地地表垂直和水平向加速度峰值及峰值比情况。由表 3 可知，随着输入地震动强度的提高，水平和竖向加速度峰值不断增大，同时其峰值比也相应增大。L1、L2、L3 地震动输入时，峰值比分别为 0.456、0.514 和 0.631，其值均小于 0.650；L4、L5 地震动输入时，峰值比分别为 0.688

和 0.756, 其值明显大于 0.650。可见, 在场地强受强烈地震动作用时, 结构抗震设计将竖向设计谱值取为水平向的 0.650 是不合理的。然而, 由于上海为 VII 度设防区, 场地土层所受地震动强度并不强烈, 因此, 按现行抗震规范进行结构设计是可行的。

表 3 场地地表垂直和水平向加速度峰值及峰值比
Table 3 Vertical and horizontal peak accelerations and their ratios on ground surface

地震动输入	加速度峰值/g		峰值比
	水平向	竖向	
L1	0.050	0.023	0.456
L2	0.093	0.048	0.514
L3	0.103	0.065	0.631
L4	0.150	0.103	0.688
L5	0.154	0.117	0.756

4.5 地下水位对水平和竖向场地放大效应的影响

上海地处长江和黄浦江入海汇合处, 由于受到潮汐的影响, 含水层中的地下水位随时间产生季节性变化。地下水位的变化实际上反映了土层有效应力的变化过程, 它会改变场地土层特性, 从而影响地震反应特征, 因此, 地震反应分析须考虑地下水位变化的影响。

图 5 分别为在三向地震输入 (L2) 且地下水位分别为 0.0、5.4、9.0、18.3 m 这 4 种不同条件时场地土层地震响应水平和竖向峰值加速度放大系数随深度的变化曲线, 这里只显示 50 m 土层深度范围内的计算结果。由图可知, 随着地下水位的上升水平峰值加速度放大效应增大, 但放大效应不显著, 在土层内部, 地下水位变化对土层地震反应影响无明显规律; 然而, 地下水位的上升对场地土层地震响应竖向峰值加速度放大系数影响十分显著。在地下水位以上, 加速度放大系数迅速增大; 而在地下水位以下, 加速度放大系数增大趋势几乎不受影响。另外, 当地下水位埋深较浅时, 竖向峰值加速度放大系数相对减小。同样, 从图 6 竖向加速度反应谱曲线可以看出, 与水平加速度呈现低频长周期特征相比, 竖向加速度的频谱组成变化不明显, 但随着地下水位深度的增大, 竖向加速度的放大作用显著, 地下水位上升对竖向地震反应具有减震作用, 这与现有国内外研究结论^[12]是一致的。可见, 地下水位上升对上海软土场地地震反应特征的影响, 在日益增多的高耸建筑物和高层结构抗震设计中都是值得注意和参考的。

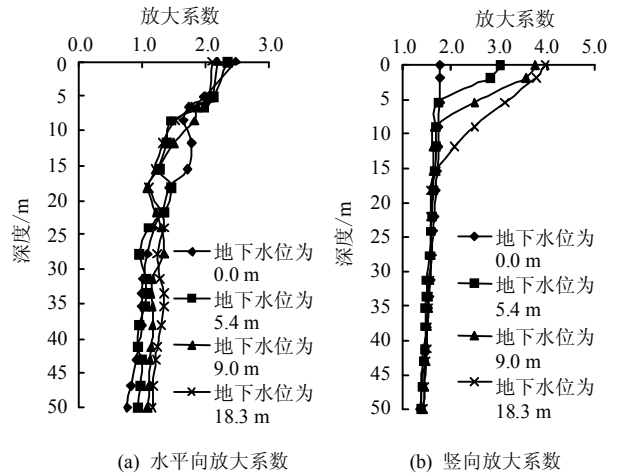


图 5 不同地下水位峰值加速度放大系数随土层深度的变化 (50 m)

Fig.5 Variation of amplification factor of peak acceleration along depth with different groundwater tables (50 m)

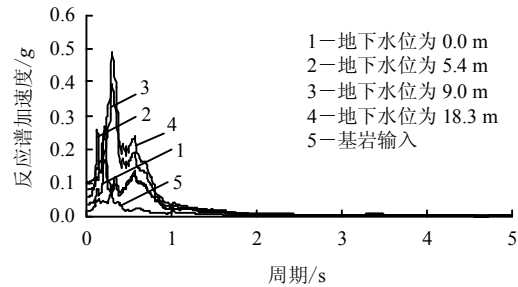


图 6 不同水位竖向加速度反应谱曲线(阻尼比为 5%)

Fig.6 Vertical acceleration response spectra with different groundwater tables (damping: 5%)

5 结 论

(1) 上海深厚软土场地对于地表水平和竖向加速度均具有明显的放大作用, 同时对水平地震加速度的频谱组成有着重要影响, 场地地表水平向加速度呈低频长周期特征, 但对地表竖向峰值加速度频谱组成影响不显著。

(2) 三向地震动输入条件下水平向加速度放大系数明显较大, 与单向水平地震动输入相比, 其放大效应可提高 12%~16%。场地土层地震响应分析只考虑单向地震动输入是远远不够的, 若忽视其他方向地震动输入影响, 有时将可能造成严重灾害。

(3) 竖直和水平方向土层的地震放大效应随基岩输入地震加速度峰值不同差别显著, 基岩输入地震加速度幅值增大, 水平向峰值加速度放大系数减小; 与此相反, 竖向峰值加速度放大系数增大, 且在整个土层深度范围, 各土层对竖向峰值加速度均呈放大作用。

(4) 场地地表水平和竖向加速度峰值及峰值比均随基岩输入地震加速度峰值水平增大而增大, 场地受强烈地震动作用时, 峰值比明显大于 0.650, 此时结构抗震设计将竖向设计谱值取为水平向的 0.650 是不合理的。但因上海为 VII 度设防区, 场地土层所受地震动强度并不强烈, 因此, 按现行抗震规范考虑竖向地震动影响进行结构设计是可行的。

(5) 地下水位上升对水平向和竖向峰值加速度的放大效应影响差异显著, 地下水位上升, 地表水平峰值加速度放大效应增大, 竖向峰值加速度放大效应减小。地下水位上升对上海软土地地震反应特征的影响, 在日益增多的高耸建筑物和高层结构抗震设计中都是值得注意和参考的。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] YANG J, YAN X R. Site response to multi-directional earthquake loading: a practical procedure[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2009, 29(4): 710—721.
- [3] 王志良, 韩清宇. 黏弹塑性土层地震反应的波动分析方法[J]. 地震工程与工程震动, 1981, 1(1): 117—137.
WANG Zhi-liang, HAN Qing-yu. Analysis of wave propagation for the site seismic response, using the viscoelastoplastic model[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1981, 1(1): 117—137.
- [4] 栾茂田, 邵宇. 土体地震反应非线性分析方法比较研究[C]//第五届全国土动力学学术会议论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 1998: 203—209.
- [5] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [6] 李小军. 黏弹塑性模型及土层地震反应分析[D]. 哈尔滨: 国家地震局工程力学研究所, 1987.
- [7] 戚承志, 钱七虎. 核电站抗震研究综述[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(3): 76—86.
QI Cheng-zhi, QIAN Qi-hu. Overview of seismic research for nuclear power plant[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 2000, 20(3): 76—86.
- [8] YOSHIDA N, KOBAYASHI S, SUETOMI I, et al. Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping[J]. **Soil Dynamic and Earthquake Engineering**, 2002, 22(3): 205—222.
- [9] 陈继华, 陈国兴, 王伟. 长江下游地区深厚软弱场地地震效应分析[J]. 世界地震工程, 2009, 25(1): 117—121.
CHEN Ji-hua, CHEN Guo-xing, WANG Wei. Analysis of seismic effect on sites with deep and soft soils in the lower reaches of the Yangtze River[J]. **World Earthquake Engineering**, 2009, 25(1): 117—121.
- [10] 黄雨, 叶为民, 唐益群, 等. 上海软土地震反应特征分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(5): 773—778.
HUANG Yu, YE Wei-ming, TANG Yi-qun, et al. Characteristic analysis for seismic ground response of soft soils in Shanghai[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2005, 1(5): 773—778.
- [11] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
- [12] YANG J, YAN X R. Factors affecting site response to multi-directional earthquake loading[J]. **Engineering Geology**, 2009, 107(3—4): 77—87.
- [13] 蔡宏英, 周健, 李相崧. 上海厚覆盖软土地层动力反应分析[C]//第五届全国土动力学学术会议论文集. 大连: 大连理工大学出版社, 1998: 284—288.
- [14] DAFALIAS Y F, HERRMANN L R. Bounding surface formulation of soil plasticity[C]//Soil Mechanics-Transient and Cyclic Loads. New York: John Wiley and Sons Ltd., 1982: 253—282.
- [15] DAFALIAS Y F. Bounding surface plasticity I: mathematical foundation and hypo-plasticity[J]. **Journal of Engineering Mechanics, ASCE**, 1986, 112(9): 966—987.
- [16] WANG Z L, DAFALIAS Y F, SHEN C K. Bounding surface hypo-plasticity model for sand[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1990, 116(5): 983—1001.
- [17] LI X S, WANG Z L, SHEN C K. A nonlinear procedure for response analysis of horizontally layered sites subjected to multidirectional earthquake loading[R]. Davis: Report to the Department of Civil Engineering, University of California, 1992.
- [18] 中华人民共和国建设部. GB50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.