

文章编号: 1005—0523(2007)01—0022—05

不同频谱特性地震动输入下的场地地震反应

卢华喜

(华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要:对进行土—结构相互作用大比例模型试验的成层土场地,在获取各层土动力特性指标的基础上,土体采用等效线性模型,进行了不同加速度峰值和不同频谱特性地震动输入下的场地三维有限元地震反应分析,研究了场地土的地震放大效应和地基的滤波效应,为进一步研究土—结构相互作用奠定了基础.

关 键 词:地震动;放大效应;滤波效应

中图分类号:TU435 **文献标识码:**A

1 前言

对于土—结构动力相互作用问题,首要是进行自由场地的地震反应分析.已有的地震灾害调查和试验研究表明,场地土对地震动运动的幅值、频谱以及强烈振动持续时间有重要影响.一般认为,场地土会对基岩传来的地震动起放大作用,如 1985 年的墨西哥地震中,墨西哥城湖区软土地基对长周期地震动起放大作用,造成该区大量建筑物破坏^[1].但另一方面,也认识到地基土对地震动可能起滤波和隔震作用^[2].了解和掌握场地土对地震动的这些影响,对建筑物抗震设计和震害分析具有重要意义.国内外学者们在这一研究方面进行了很多工作.如 Idriss 和 Seed^[3]用一维剪切梁模型分析了匀质自由场地土及剪切模量沿深度按幂函数变化的场地土层横向振动下的反应;Wolf^[4]分析了匀质自由场地土的竖向振动反应;Davis、Zhao 等^[5,6]人则采用等效线性化解法对剪切模量沿深度按幂函数分布的自由场地土的地面运动进行了分析.本文对进行土—结构动力相互作用的大比例模型试验的成层土场地,在试验获取各层土动力特性指标的基础上,建立了三维有限

元模型,进行了不同频谱特性和不同加速度峰值下的地震反应分析,研究了这一实际场地的地震放大效应和滤波效应,为下一步进行土—结构动力相互作用分析奠定了基础.

2 场地土的工程地质条件

场地原为菜地和耕地,地形平坦,地貌单元属于丘陵冲沟.根据钻孔所知,场地内地层从上往下依次为:耕土,厚度为 1.00~2.40 m,平均 1.62 m;粉质粘土,硬塑,厚度为 0.60~2.80 m,平均 1.90 m;残积粉质粘土,硬塑,厚度为 0.50~2.70 m,平均 1.14 m;强风化泥质板岩,控制厚度 4.10~8.80 m;中风化泥质板岩.对该场地土层剪切波速进行测试,各层剪切波速依次为 150、250、320、>500 m/s,根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2001)相关规定得到等效剪切波速为 230.89 m/s,因此可知,本场地土的类型为中软土,建筑的场地类别为Ⅱ类.现场勘察共取原状土样 6 组进行室内试验,其结果如表 1 统计所示,场地等效剪切波速计算如表 2.

表 1 实测主要岩土层物理力学性质参数表

土层名称	粘聚力 (kPa)	摩擦角 (°)	剪切波速 (m/s)	泊松比
耕土	10	6	150	0.35
粉质粘土	60	12	250	0.35
残积粉质粘土	65	15	320	0.3

表 2 场地等效剪切波速计算表

土层厚度	剪切波速 (m/s)	地层厚度 (m)		等效剪切波速 (m/s)		平均值 (m/s)
		钻孔 1	钻孔 2	钻孔 1	钻孔 3	—
钻孔孔口标高	—	—0.79	—2.78			
钻孔处设计整平标高	—	—0.79	—2.78			
耕土	150	2.40	1.20			
粉质粘土	250	1.40	2.80	225.47	236.32	230.89
残积粉质粘土	320	2.70	1.10			
以下为强风化泥质板岩	>500	—	—			
计算深度	—	7.90	6.70			

3 场地的地震反应分析

为研究场地在地震动输入下的地震反应规律,对于上述场地建立了三维有限元模型.根据文^[7]的结果,有限元模型中土域水平范围取为 10 倍基础宽度范围,深度方向取至基岩,且基岩为剪切波速大于 500 m/s 的土层,根据文^[7]中对单元尺寸的要求对土层采用 8 节点实体单元离散.

土域边界采用三维粘弹性边界即式(1),式中 C_b 和 K_b 分别为相应方向上的阻尼系数和刚度系数, G_{dmax} 为最大动剪切模量, ρ 为土体密度, c_s 、 c_p

分别为剪切波速、压缩波波速, r_b 为散射波源到人工边界的距离.

切向: $C_b = \rho c_s$ $K_b = \frac{2 G_{dmax}}{r_b}$ (1a)

法向: $C_b = \rho c_p$ $K_b = \frac{4 G_{dmax}}{r_b}$ (1b)

土体采用等效线性模型,文^[7]中对场地各层土取原装土样进行了室内循环单剪试验,确定了各层土的动力特性指标如表 3,表中 γ_d 为动剪应变.有限元模型建成后进行模态分析得到土体的自振频率为 10.86 Hz.

表 3 场地各土层动力特性指标

土层名称	最大动剪切模量 G_{dmax} (kPa)	模量比曲线 $G_d / G_{dmax} \sim \gamma_d$	阻尼比曲线 $D / D_{dmax} \sim \gamma_d$
耕土	41986	$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{1 + 1390.69 \gamma_d}$	$\frac{D}{D_{dmax}} = 2.26 \left[\frac{\gamma_d}{1 + 225.54 \gamma_d} \right]^{0.19}$
粉质粘土	128866	$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{1 + 3110.23 \gamma_d}$	$\frac{D}{D_{dmax}} = 3.10 \left[\frac{\gamma_d}{1 + 81.63 \gamma_d} \right]^{0.24}$
残积粉质粘土	198535	$\frac{G_d}{G_{dmax}} = \frac{1}{1 + 3150.58 \gamma_d}$	$\frac{D}{D_{dmax}} = 1.23 \left[\frac{\gamma_d}{1 - 11.21 \gamma_d} \right]^{0.10}$

选用不同频谱特征的 EL Centro 波和 Concrete 波作为输入地震动进行地震反应分析,地震动输入持时均为 8 s,其中 EL Centro 波的 N—S 分量,如图 1

所示,图中给出了加速度时程及其 Fourier 谱;Concrete 波的加速度时程及其相应 Fourier 谱如图 2 所示.为探讨输入地震动强度的影响,将所有输入地震

波的峰值水平分别调整为 0.35 m/s^2 、 0.70 m/s^2 。计算分析中把 EL Centro 波的 0.35 m/s^2 、 0.70 m/s^2 、加速度峰值输入下的数值结果分别简记为 EL35、

EL70；把 Concrete 波的 0.35 m/s^2 、 0.70 m/s^2 加速度峰值输入下的数值结果分别简记为 CN35、CN70。

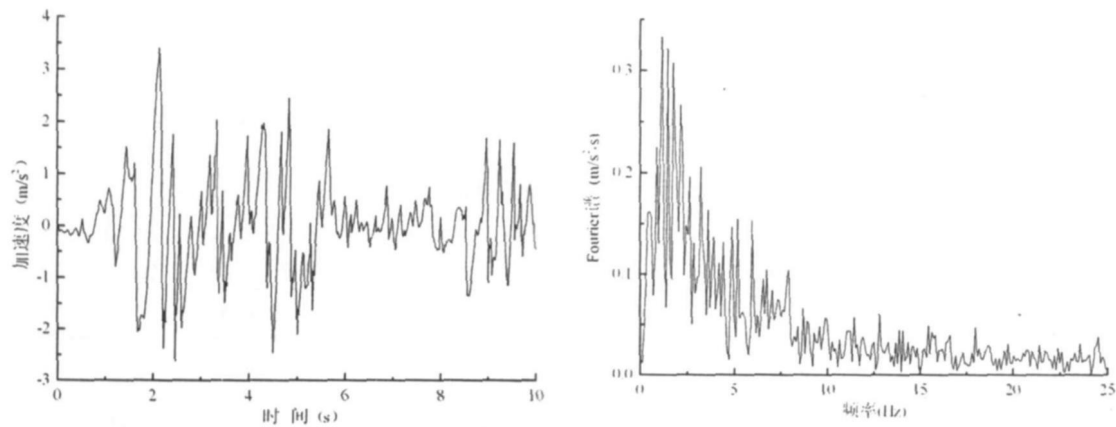


图 1 EL Centro 波加速度时程及 Fourier 谱

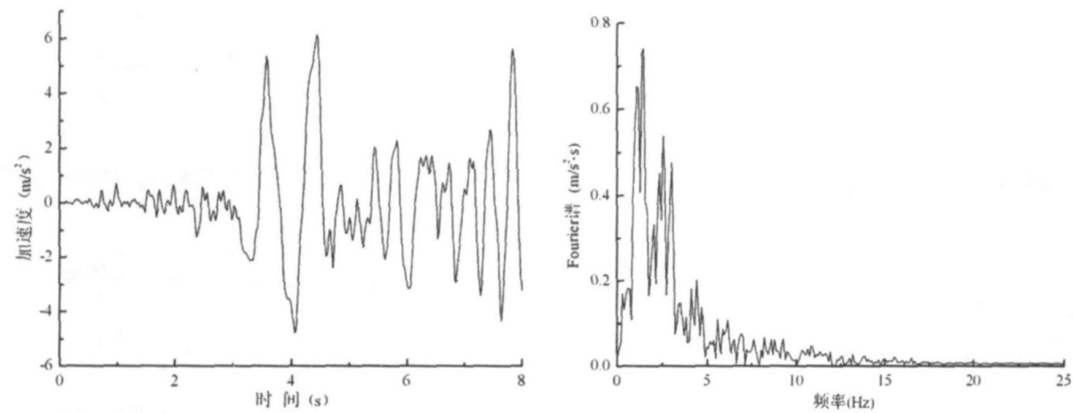


图 2 Concrete 波加速度时程及 Fourier 谱

3.1 场地的放大效应

对与基岩以上的土体，在同一平面位置、不同深度处地基的加速度峰值相对于基岩面上加速度峰值的放大系数与各点深度的关系曲线，如图 3 所示。

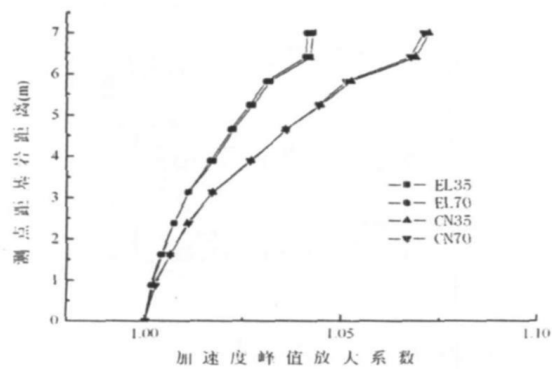


图 3 土体中沿深度各点加速度峰值放大系数

从图中可以看到：

- (1)随着土层中各点距基岩面距离的增加，土体的加速度峰值放大系数呈增大的趋势。
- (2)相对于基岩面的加速度峰值，土层中各点的加速度峰值放大系数均大于 1，中软土起到放大地震效应的作用。
- (3)对同一频谱特性地震波的输入下，随着输入加速度峰值的增加，土体加速度峰值放大系数减小。其原因是随着输入震动的增强，土体非线性加强，土传递振动的能力减弱。
- (4)在不同频谱特性地震波的输入下，土体加速度峰值放大系数差异较大，表明地震波频谱特性对场地的地震反应影响较大。本文中 Concrete 波地震动输入下土体的加速度峰值放大系数明显较 EL Centro 波输入下要大，这是由于 Concrete 波的低频成

分更为丰富,而土体和体系的频率也较小,体系的反应得到了加强.

3.2 地基的滤波效应

对 EL Centro 波输入工况下的场地地震反应,在土层不同深度处得到的 Fourier 谱图如图 4~图 9 所示.

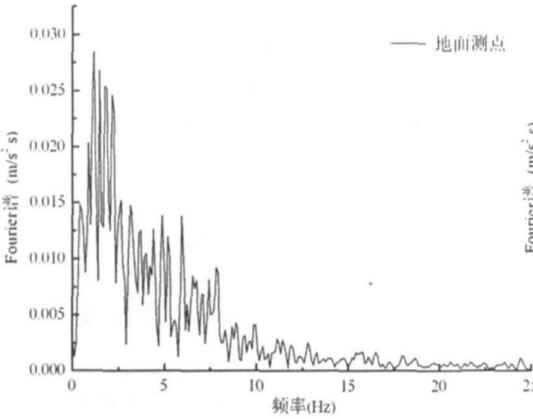


图 4 地面测点的 Fourier 谱(EL35 工况)

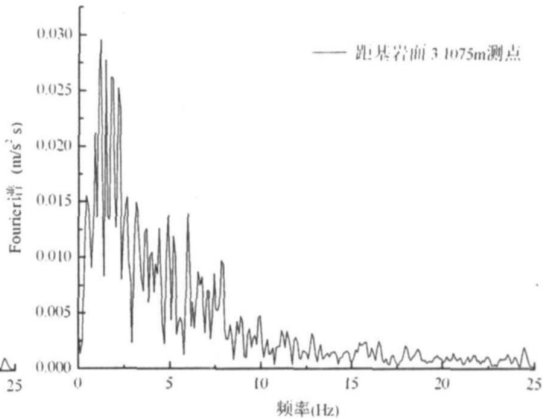


图 5 距基岩面 3.1075 m 测点的 Fourier 谱(EL35 工况)

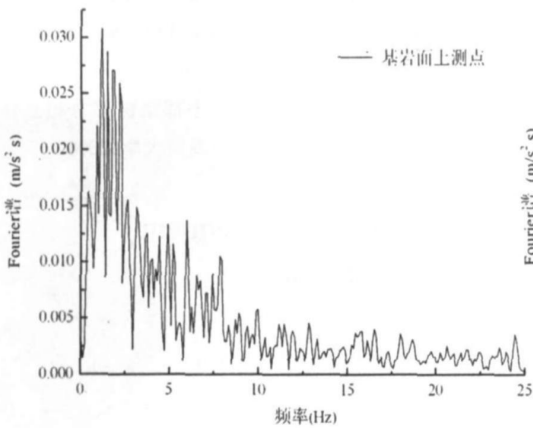


图 6 基岩面测点的 Fourier 谱(EL35 工况)

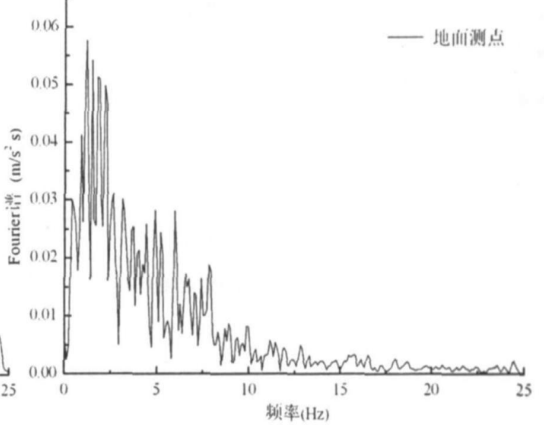


图 7 地面测点的 Fourier 谱(EL70 工况)

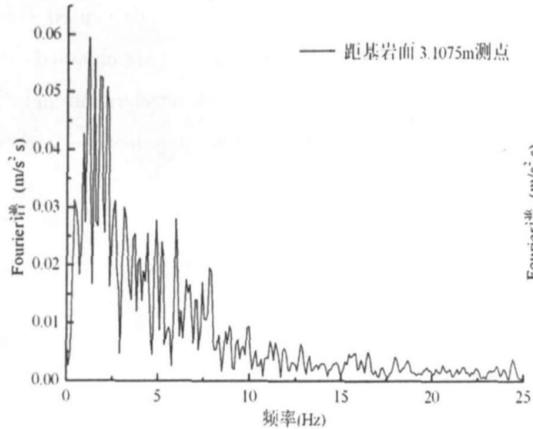


图 8 距基岩面 3.1075 m 测点的 Fourier 谱(EL70 工况)

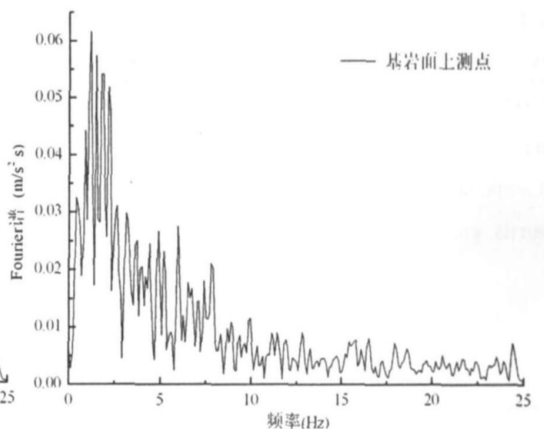


图 9 基岩面测点的 Fourier 谱(EL70 工况)

从 Fourier 谱图可以看出:地基过滤了大部分的高频地震动,而仅留下了低频成分,且越接近土层表

面,这种滤波作用越加明显,Concrete 波输入工况下的反应也可以得出类似的规律,限于篇幅,这里没有

给出 Fourier 谱. 此外, 随着输入加速度峰值的增强, 地基的这种滤波作用也更为明显.

4 结语

本文为认识自由场地的地震反应规律, 对土—结构动力相互作用大比例模型试验的成层场地, 采用土体等效线性模型, 建立了三维有限元模型, 进行了不同加速度峰值和不同频谱特性地震动输入下的地震反应分析. 研究表明, 随着土层中各点距基岩面距离的增加, 土体的加速度峰值放大系数呈增大的趋势, 相对于基岩面的加速度峰值, 土层中各点的加速度峰值放大系数均大于 1, 中软土起到放大地震效应的作用, 对同一频谱特性地震波的输入下, 随着输入加速度峰值的增加, 土体加速度峰值放大系数减小, 在不同频谱特性地震波的输入下, 土体加速度峰值放大系数差异较大, 表明地震波频谱特性对场地的地震反应影响较大, 同时地基过滤了大部分的高频地震动, 而仅留下了低频成分, 且越接近土层表面, 这种滤波作用越加明显, 而且随着输入加速度峰

值的增强, 地基的这种滤波作用也更为明显.

参考文献:

- [1] Mendoza M J, Auvinet G. The Mexico earthquake of September 19, 1985 — behavior of building foundation in Mexico city [J]. *Earthquake Spectra*, 1988, 4(4): 835—853.
- [2] 陈跃庆, 吕西林, 侯建国, 等. 不同土性地基中地震波传递的振动台模型试验研究 [J]. *武汉大学学报*, 2005, 38(2): 49—53.
- [3] Idriss I M, Seed H B. Seismic response of horizontal soil layers [J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1968, 94 (4): 1003—1031.
- [4] Wolf J P 著. 土—结构动力相互作用 [M]. 吴世明译. 北京: 地震出版社, 1989.
- [5] Davis R. Effects of weathering on site response [J]. *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*, 1995, 24(2): 301—309.
- [6] 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.
- [7] 卢华喜. 成层地基—桩基—上部结构动力相互作用理论分析与试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2006.

Earthquake Response of Sites under Different Frequency Spectrum Features Ground Motion

LU Hua-xi

(School of Civil Eng. and Arc., East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: To the layered soil of dynamic soil-structure interaction large-scale model test, commonly used equivalent linearity model is chosen to consider the non-linearity of soil and the dynamic characteristics of soil are obtained, then the earthquake response of three-dimensional finite element model is analyzed under different peak acceleration and different frequency spectrum features ground motion, and the seismic amplification of sites and soil filtering effect are studied. The present work lays a foundation for further research on soil—structure interaction.

Key words: ground motion; amplification; filtering effect