

# 分层土 - 箱基 - 框架结构在爆破地震作用下的计算分析

朱志辉, 尚守平, 吴方伯, 熊辉

(湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082)

**摘要:**以野外大比例(1:2)分层土-箱基-框架结构试验模型的爆破震动试验数据为基础,利用有限元软件 ANSYS 二次开发语言 apdl 二次开发,将多次透射公式(MTF)添加到软件中从而实现对无限域的模拟,进而利用整体动力有限元方法研究人工透射边界、箱基周围回填土属性、软弱夹层及地震波主频范围等参数对上部框架动力反应的影响。数值算例与试验结果对比表明:爆破震动作用下,考虑二阶透射边界的数值结果和试验结果吻合较好,能模拟结构的真实动力反应,而固定边界和固基假定的计算结果偏大;箱基埋置深度浅、下卧土层刚度较大时,箱基周围回填土属性对结构反应影响不大;场地土中的软弱夹层对上部结构起到隔振减震的作用;与高频爆破地震波相比,低频地震波所产生的结构加速度反应更大,对结构破坏作用更强;固基假定下的结构反应计算结果在一些特定情况下并不总偏安全。  
**关键词:**爆破震动试验;土-结构动力相互作用;多次透射边界;动力有限元

中图分类号: TU471

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)02-0231-06

**作者简介:**朱志辉(1979-),男,河南信阳人,博士,从事土-结构动力相互作用方面的研究。E-mail: zzh0703@163.com。

## Computational analysis of layered soil-box foundation-structure dynamic interaction under explosive earthquake waves

ZHU Zhi-hui, SHANG Shou-ping, WU Fang-bo, XIONG Hui

(Department of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Experimental researches on a large-scale (1:2) in-situ model test of layered soil-box foundation-structure system to study the dynamic interaction under explosive earthquake waves were carried out. By applying a secondary development to ANSYS with multi-transmitting boundary, the effects of artificial transmitting boundary (ATB), property of backfilled soil, the weak intercalation and main frequency range on superstructure were comprehensively investigated. Compared with the results of fixed soil boundary and fixed base boundary, the results of ATB agreed well with the test results. Stiffness variation of backfilled soil played a small role on superstructure response when the substratum was relative stiff and the box foundation embedment was shallow. The weak intercalation could reduce the seismic response of superstructure. Acceleration and damage of superstructure under low frequency earthquake was larger than that under high frequency blast earthquake. At the same time, in some special cases, the computed results under the fixed base assumption were not always on the safeside.

**Key words:** blast vibration test; soil-structure dynamic interaction; multi-transmitting boundary; dynamic finite-element method

## 0 引言

在土木工程学科的诸多问题中,由于土-基础-上部结构动力相互作用问题(简称 SSI 问题)的复杂性,近年来受到了越来越多的关注。对于 SSI 问题的研究大致可分为理论研究、模型试验以及现场原型试验 3 部分。理论研究最早开始于 20 世纪 30 年代,经过几十年的发展,国内外学者在土-结构相互作用领域取得了长足进展,已有很多理论研究成果及计算模型,但到目前为止大多数动力 SSI 计算模型得不到大型试验的校验。为能够为 SSI 问题的理论研究提供一

个可以比较和参考的依据,我们在野外现场制作了一个 1:2 的大型框架结构模型。与实际结构相比,该框架模型具有结构形式简单、易于准确描述结构质量、刚度矩阵以及振动特性,便于应用理论公式和计算机数值模拟。与室内振动台试验相比,野外大比例模型试验具有:①结构模型采用较大比例制作,系统反应更为接近真实结构反应;②可以避免由于波在有界土体边界上反射对结构振动造成干扰这两个显著特点,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50278033; 50578062)

收稿日期:2005-11-24

所以该野外大比例模型对于验证理论研究以及计算模型的正确性有着极高的参考价值。

## 1 试验模型设计

### 1.1 相似关系

本试验选取是一个双向单跨的7层框架结构为原型,按1:2比例进行模型设计。由于试验模型涉及到野外场地土体,要想完全做到相似率既考虑重力场的影响,又考虑场地土材料本构特性是非常困难的事情。因此将以实际模型试验情况来讨论土-箱基-上部结构动力相互作用的一些规律。

### 1.2 模型设计与制作

模型混凝土强度等级为C30,粗骨料最大粒径小于15mm。根据钻孔揭露,场地内地层从上往下依次为:耕土、粉质黏土、角砾、残积粉质黏土、强风化泥质板岩;由场地土原位测试及剪切波速测试结果可知,场地土类型为中软土,建筑场地类别为II类。模型结构形式为:底部是箱形基础,箱基埋深1.8m,正方形箱基边长3.25m;上部结构是7层框架,柱距3m,第一层层高2.1m,其余各层层高1.65m,结构总高12m。在结构第七层有一块厚200mm,长1000mm的剪力墙,在剪力墙上下各有一根200mm高,200mm宽的梁。该剪力墙用来固定顶部激振器。构件尺寸及配筋见文献[1],模型现场图片如图1所示。



图1 结构模型现场

Fig. 1 Filed picture of structure model

## 2 有限元模型建模方法

### 2.1 多次透射(MTF)边界条件

为了解决在用有限离散模型模拟无限地基时出现的波在人工截取边界上的反射问题,许多学者提出了各种人工边界,如边界元法<sup>[2]</sup>、无穷元法<sup>[3]</sup>等全局人工边界条件以及黏性边界<sup>[4]</sup>、旁轴近似边界<sup>[5]</sup>、透射边界<sup>[6]</sup>等局部人工边界条件。目前在和通用有限元结合方面,使用较广的人工边界就是最早由Lysmer提出的黏性边界以及后来进一步发展的黏-弹性边界。但这种人工边界在精度上仅仅是一阶精度,而且在分析

散射问题时需要把地震动输入先转化为边界节点等效荷载,应用上较为繁琐。廖振鹏于1984年提出的透射边界以精度高、实用性强以及便于和通用有限元软件结合等优点而受到关注。该方法直接在边界上模拟波从有限计算模型的内部穿过人工边界向外透射的过程,认为由透射方法产生的误差也可视为一个向外传播的波,因此提出了多次透射的概念。

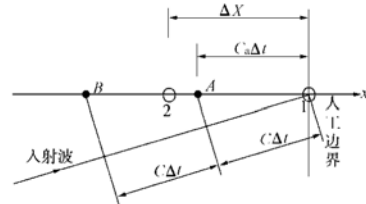


图2 透射公式计算模型

Fig. 2 Multi-transmitting formula computational model

如图2所示,假设出平面波 $u(t,x)$ 沿着x轴从人工边界左边以入射角 $\theta$ 和波速 $c$ 射向人工边界,边界上1号节点的运动可以由前一些时刻内部一些点的运动表示如下<sup>[7]</sup>:

$$u(t + \Delta t, x) \approx \sum_{j=1}^N (-1)^{j+1} C_j^N u_j(t - (j-1)\Delta t, x - jC_a \Delta t) \quad (1)$$

式(1)即为 $N$ 阶透射公式。经证明二阶和三阶透射公式即可满足计算精度要求。由于模拟的仅仅是外行波,对于散射问题,其输入为来自无限域的弹性波。因此,就人工边界所包围的计算区内的波动而言,既有外行波也有内行波。由于MTF只能模拟外行波,在运用MTF建立边界节点的运动方程时,必须从全波场中分离出外行波,设分离出的外行波位移为 $u_s$ ,全波场位移为 $u$ ,参考波场为 $u_r$ 。外行波位移可写为

$$u_s = u - u_r \quad (2)$$

对于底边界,参考波场可直接取输入场,对侧边界,则通常取为自由场。自由场是指当广义结构不存在时入射波在无限域中产生的波场,可以直接在时域中针对局部区域进行自由波场计算,并进行波场分离。

### 2.2 场地非线性

土体作为一种非弹性介质,采用不同的本构模型其计算结果会产生较大的差异;简单采用弹性本构关系不能得到土体中合理的应力应变关系,而采用复杂的运动硬化帽盖本构模型从理论上来说是较完美的,但对于实际分析中具有大量单元节点划分的场地土而言其计算耗时限制了其应用,且在非线性迭代过程中难以控制其收敛。故本文分析中采用工程分析中常用的Druck-Prager理想-弹塑性模型来反应土的非线性参与,其模型遵从如下屈服准则:

$$F = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - k = 0 \quad (3)$$

式中,  $I_1, J_2$  分别为第一应力张量不变量和第二偏应力张量不变量, 材料的破坏包络参量  $\alpha_i, k_i$  的选择应与莫尔 - 库仑屈服准则相匹配 (因为 D-P 模型只是 Coulomb 模型的一种不考虑  $J_3$  偏量影响的简化形式, 但是其消除了积分的棱角奇异性), 一般地可取:

$$\alpha_i = \frac{2 \sin \varphi_i}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi_i)}}, \quad k_i = \frac{6c_i \cos \varphi_i}{\sqrt{3(3 - \sin \varphi_i)}} \quad (4)$$

式中,  $c_i, \varphi_i$  分别为每层土材料的黏聚力 (Pa) 和内摩擦角 ( $^\circ$ )。

### 2.3 土体与箱形基础间的接触非线性

在土与箱形基础接触面部位, 由于两种材料相对刚度 ( $E_p/E_s$ ) 较大, 且土的抗拉能力较小以至可以忽略不计。在循环动力荷载尤其是地震作用下, 当两者间接触面上的应力水平超过一定限制, 位移的连续性就会受到破坏, 那么就会发生滑移、脱开与再接触等非线性行为。近年来各国学者提出了许多种不同类型的界面单元来模拟土体与基础交界面上的状态非线性, 如两节点单元、Goodman 单元、Desai 单元、接触摩擦单元以及薄层单元等。本文利用文献[8]的方法确定法向劲度系数  $\lambda_n$ , 在 ANSYS 程序实施过程中, 通过刚柔接触对中的法向接触刚度因子来定义  $\lambda_n$ 。这样接触刚度值可认为是仅由变形土体的材料特性来确定的参数, 以避免选择该值计算时的盲目性。

## 3 有限元模型基本参数

1:2 框架结构模型平面简图如图 3 所示, 柱距为 3 m, 各部分构件尺寸如表 1 所示。基础为箱基, 箱基顶板板厚 200 mm, 底板板厚 300 mm, 侧壁壁厚 100 mm, 箱基高 1.8 m。框架结构设计混凝土强度等级为 C30, 根据现场同等条件养护的混凝土立方体试块轴心抗压强度试验, 框架结构混凝土弹性模量取  $3.64 \times 10^{10}$  Pa。通过现场剪切波速试验以及室内土样剪切试验得到的场地土物理力学参数如表 2 所示。土域

截断边界距试验模型中心 10 m; 从表 2 中可以看出, 第四层土的剪切波速为 521 m/s, 根据文献[9, 10]的研究成果, 计算模型的底部边界深度取为 8 m。

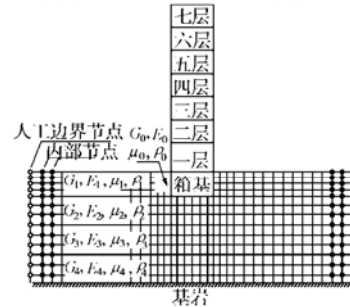


图 3 分层土-箱基-框架结构简化模型

Fig. 3 Simplified model of layered soil-box foundation-structure

为了准确得到结构的阻尼比, 我们通过结构脉动试验、以及结构顶部牵引释放自由振动试验两种方法进行基本振型和阻尼比的对比分析, 最后得到体系的前三阶基频值分别为  $\omega_1 = 1.89$  Hz,  $\omega_2 = 6.30$  Hz,  $\omega_3 = 11.45$  Hz, 和前三阶基频对应的阻尼比分别为  $\zeta_1 = 1.71\%$ ,  $\zeta_2 = 1.16\%$ ,  $\zeta_3 = 1.07\%$ 。瑞雷阻尼中质量矩阵的参与系数  $\alpha$  和刚度矩阵的参与系数  $\beta$  可以通过结构前两阶自振频率对应的阻尼比计算。

## 4 参数分析

以 2005 年 1 月 23 日的满载爆破试验为依据, 分析人工边界、基础周围回填土属性、土层属性、基础和土体接触非线性及地震波频率对结构顶层加速度的影响。图 4、5 为 96 m 远处 11 个孔 5 kg 炸药同时起爆时在模型周围自由场地 A 点和 7 层顶点 B 点所测试得到的加速度时程曲线及傅氏谱。其中 A 点的加速度峰值为  $0.511 \text{ m/s}^2$ , 主频范围 20~40 Hz; B 点的加速度峰值为  $0.311 \text{ m/s}^2$ , 各阶振型的参与情况为以高阶振型为主。在下面的参数分析中, 将 A 点时程曲线作为输入波, 研究不同情况下 B 点的加速度变化规律。

表 1 框架结构模型参数

Table 1 Parameters for model of frame structure

楼层编号	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层	6 层	7 层
高度/m	2.1	3.75	5.4	7.05	8.7	10.35	12
质量/kg	3267.2	3038.1	2885.1	2885.1	2885.1	3401.1	3000.2
柱子截面/mm <sup>2</sup>	250 × 250	225 × 225	225 × 225	225 × 225	225 × 225	225 × 225	225 × 225
梁截面/mm <sup>2</sup>	125 × 250	125 × 250	125 × 200	125 × 200	125 × 200	125 × 200	125 × 200
板厚/mm	75	75	75	75	75	75	75

表 2 土层物理力学参数

Table 2 Physicomechanical parameters of the soil layer

位置	土层厚度/m	弹性模量/Pa	剪切波速/(m·s <sup>-1</sup> )	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	黏聚力/Pa	内摩擦角/( $^\circ$ )
回填土	1.8	$4.75 \times 10^7$	100	1900	0.25	10000	20
第一层	1.8	$1.04 \times 10^8$	146	1950	0.25	16000	22
第二层	2.2	$2.69 \times 10^8$	231	2020	0.25	20000	25
第三层	2	$7.36 \times 10^8$	379	2050	0.25	21000	25
第四层	2	$1.39 \times 10^9$	521	2050	0.25	21000	25

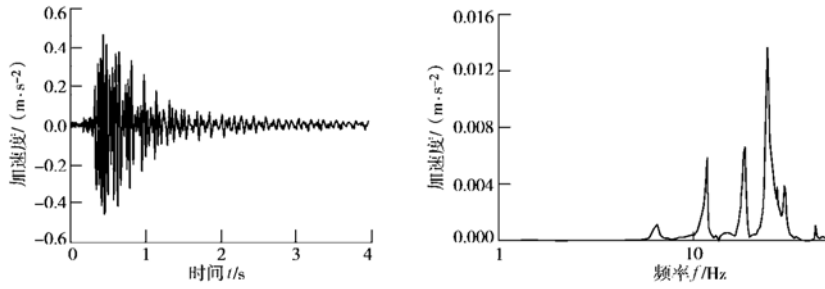


图 4 A 点加速度时程及其傅氏谱

Fig. 4 Acceleration time history and Fourier spectrum of point A

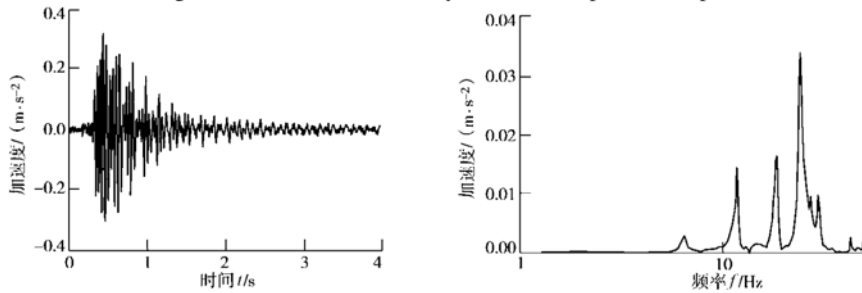


图 5 B 点加速度时程及其傅氏谱

Fig. 5 Acceleration time history and Fourier spectrum of point B

#### 4.1 土体截断边界对数值结果的影响

为了有效地对 SSI 动力相互作用问题进行研究,对半无限土体进行人为截断以减少计算工作量是提高工作效率的必然选择。怎么样有效地减小由于外行波在人工边界上反射对计算精度的影响程度,国内外很多学者提出了不同的解决方案。

0.344, 0.326  $m/s^2$ , 考虑与不考虑透射边界的情形加速度相差 17.4%, 与固基假定的加速度相差 11.3%。设置了二阶透射边界的计算结果最小, 从波形上也和试验结果较为吻合; 固定边界与固基两种计算结果最大且均比试验值大, 这种结果也是符合土 - 结构物共同作用理论的基本共识; 由于固定边界与固基两种约束情况下, 结构物振动产生的外行波无法穿过边界向外界辐射, 从而导致结构振动加速度要大于实际值。

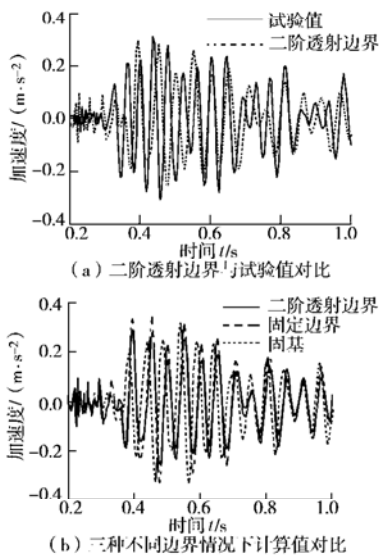


图 6 7 层 B 点加速度反应时程曲线

Fig. 6 Acceleration time history of point B

图 6 (a) 中给出了输入自由场地 (A 点) 采集的爆破地震波的考虑土 - 箱基 - 框架结构共同作用设置边界 (MTF) 计算值与试验值 B 点加速度时程对比; 图 6 (b) 中给出了考虑共同作用的设置边界、不设边界及不考虑共同作用的 B 点加速度时程间的比较结果, 3 种情况下计算的 B 点加速度最大值分别为 0.293,

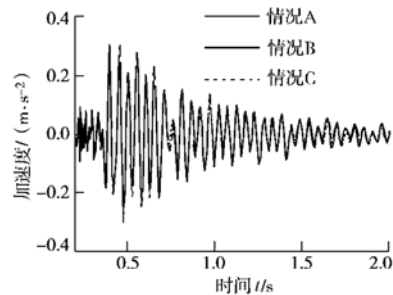


图 7 回填土对 B 点加速度的影响

Fig. 7 The effect of backfilled soil on acceleration of point B

#### 4.2 回填土属性对上部结构的影响

图 7 中对比了 3 种情况下回填土对结构物振动特性的影响: ①情况 A, 不换土; ②情况 B, 将回填土替换成改性土, 假设  $E = 5 \times 10^9 N/m^2, \mu = 0.25, \rho = 2000 kg/m^3$ , 其余土层同前; ③情况 C, 将回填土全部挖空, 其余土层同前, 不考虑箱基周围的土体, 只有箱基底板和土接触。A, B, C 3 种情况的有限元计算模型均考虑了土体材料非线性、接触非线性及土体的二阶透射边界。3 种情况下第 7 层顶点 (B 点) 的波形相似, 仅仅是幅值稍有区别, 加速度幅值为 0.293, 0.302, 0.305  $m/s^2$ 。出现此现象的原因是箱基下卧土层相对较

硬, 同时基础的埋置深度较浅, 与箱基侧壁相接触的土层对基础的约束本身就不强, 故此情况下加强或者削弱回填土的性状对上部结构的动力反应影响不大。

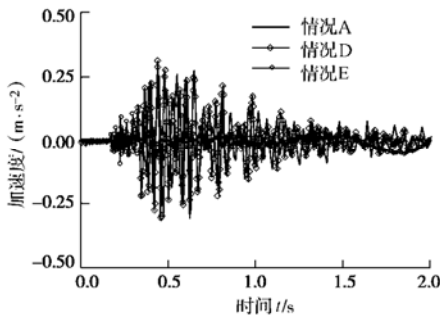


图 8 软弱夹层对 B 点加速度的影响

Fig. 8 The effect of weak intercalation on acceleration of point B

### 4.3 软弱夹层对上部结构的影响

关于软弱夹层对地震动的影响是土 - 结构动力相互作用研究领域的一个重要课题。通常情况下, 软弱夹层对地震波具有阻隔作用, 研究含有软弱夹层场地的地震动力反应对评价场地地基抗震性能、分析上部结构的地震反应都有重要意义<sup>[10-12]</sup>。图 8 中对比了 3 种情况下基础下卧层对上部结构地震反应的影响: ①情况 A, 不改变下卧土层刚度; ②情况 D, 假定第二层土为坚硬土层,  $E = 2.69 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ,  $\mu = 0.25$ ,  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ , 其余土层同前; ③情况 E, 假定第二层土为软弱土层,  $E = 1 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ ,  $\mu = 0.25$ ,  $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$ , 其余土层同前, A, D, E 3 种情况的有限元计算模型均考虑了土体材料非线性、接触非线性、以及土体的二阶透射边界。3 种情况下第 7 层顶点 (B 点) 的加速度幅值为 0.293, 0.301, 0.139  $\text{m/s}^2$ 。由算例可知: 由于软弱夹层的存在, 情况 E 的相互作用体系上部结构加速度反应较情况 A 和情况 D 的要小, 场地土中的软弱夹层对上部结构地震反应起到减震隔振的作用: 由于情况 A 中第二层土体刚度相对上部框架结构刚度而言较刚, 所以即使提高第二层土体刚度, 在情况 D 算例中坚硬土层对上部结构的地震响应影响不大。

### 4.4 地震波频率的影响

爆破地震波和天然地震波在频率组成上有着本质的区别。爆破地震波持续时间短 (0.2~2 s)、主频高 (0.5~200 Hz)、衰减快传播距离短<sup>[13]</sup>; 天然地震波主要来自地壳内部相互错动、火山爆发等激励因素, 因此能量巨大, 主频以低频震动为主。同时天然地震波经过无数次的反射折射以后, 剪切波和面波携带的能量最大, 对结构的破坏能力也最强。图 9 为修改 Elcentro 地震波, 将原始 Elcentro 地震波的加速度峰值调整为 0.511  $\text{m/s}^2$ 、主频调整为 6~8 Hz。

图 10 (a) 对比了二阶透射边界和固基两种情况下框架顶层 B 点的加速度时程, 加速度幅值分别为 2.01、1.93  $\text{m/s}^2$ 。虽然考虑相互作用结构反应仅仅比

固基结构顶点加速度大 4%, 但这一结果表明在有些时候对结构作固基假定进行抗震计算并不一定总是安全的。

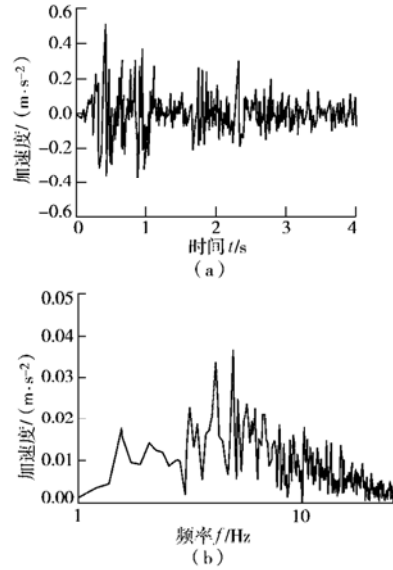


图 9 修改的 Elcentro 地震波时程及傅氏谱

Fig. 9 Time history and Fourier spectrum of modified El Centro ground motion

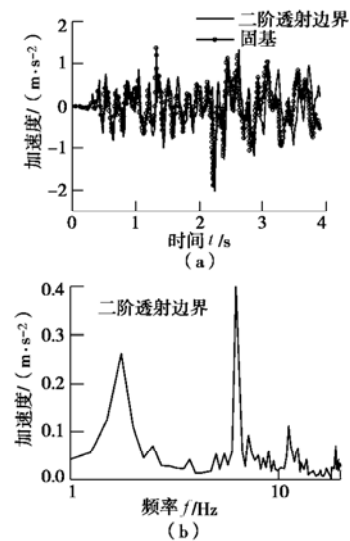


图 10 修改的 Elcentro 波作用下 B 点时程及傅氏谱

Fig. 10 Time history and Fourier spectrum of point B under modified El Centro ground motion

图 10 (b) 为二阶透射边界情况下框架顶层 B 点的傅氏谱。和图 5 相比可知土 - 箱基 - 框架结构在低频的修改 Elcentro 地震波作用下, 结构振动以低阶振型为主; 同时在加速度幅值相同的情况下, 修改 Elcentro 地震波作用下框架顶层 B 点加速度是爆破地震波作用下 B 点加速度的 7 倍。这种结果和大量爆破震动监测的结构物实际破坏现象相吻合<sup>[14]</sup>, 由于在爆破震动中, 距离爆心较近的位置虽然地面加速度很大, 但是地震波主频较高往往不会对结构产生破坏性的影响; 相反结构发生严重破坏的地点有时会出现出现在距离爆心较远的位置, 主要是由于在爆破远区地震波的主

频由场地固有频率决定。当这个固有频率和结构物自振频率接近时,即使地面输入加速度峰值不大,也同样可能对结构造成严重的破坏。

## 5 结 论

(1)给出了可适应工程需要的二维平面简化动力有限元分析,土体横向边界取3倍结构横向尺寸,并在横向边界处施加二阶透射边界,可较好地模拟无限域土体。

(2)通过对比不同回填土属性对结构动力反应的影响可知:当基础下卧土层较刚,并且基础埋置较浅时,基础旁边回填土的性状对结构动力反应影响不大。

(3)通过变换基础下卧土层刚度可知:场地土中软弱夹层的存在,上部结构加速度动力反应有所减弱,软弱夹层对地震波具有阻隔作用。

(4)同一计算模型在不同频谱组成的地震波作用下,结构动力反应相差很大,这一点和目前大量爆破震动对结构物破坏的监测结果吻合,同时也说明结构自振周期一定要避开场地土的特征周期,避免在地震过程中发生共振现象。

(5)考虑相互作用的二阶透射边界模型和固基模型在修改的 Elcentro 地震波作用下,固基计算的结构加速度动力反应要小于相互作用的计算结果,所以如果不考虑实际场地土情况,简单的对固基计算结果进行折减来指导设计,有可能造成不安全的结构设计。

### 参考文献:

- [1] 尚守平,等. 土-箱型基础-结构动力相互作用的模态试验分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2004, **31**(5): 71 - 76. (SHANG Shou-ping, et al. Modal experimental analysis for soil-box foundation-structure dynamic interaction system[J]. Journal of Hunan University (Nature Sciences), 2004, **31**(5):71 - 76. (in Chinese))
- [2] DOMIGUEZ J. Boundary elements in dynamics[M]. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1993.
- [3] MEDINA F, TAILO R. Finite element technicals for unbounded domains[J]. Int J Nume Methods in Engi, 1983, **19**(4):1209 - 1226.
- [4] LYSMER J, KULEMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of Engng Mech Div, ASCE, 1969,**95**: 859 - 877.
- [5] CLAYTON R, ENGQUIST B. Absorbing boundary conditions for wave-equation migration[J]. Geophysics, 1980, **45**: 895 - 904.
- [6] 廖振鹏,黄孔亮,杨柏坡,等. 暂态波透射边界[J]. 中国科学(A辑), 1984, **26**(6): 50 - 56. (LIAO Zhen-peng, HUANG Kong-liang, YANG Bai-po, et al. A transmitting boundary for transient wave analyses[J]. Scientia Sinica(Series A), 1984, **26**(6): 50 - 56. (in Chinese))
- [7] 廖振鹏. 工程波动理论导论 [M]. (第二版). 北京: 科学出版社, 2002. (LIAO Zhen-peng. Introduction to wave motion theories for engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 熊 辉. 层状场域内上、下部结构动力相互作用分析及其优化设计[D]. 湖南大学, 2003. (XIONG Hui. The investigation of supstructure-substructure dynamic interaction and dynamic optimization design[D]. Changsha: Hunan University, 2003. (in Chinese))
- [9] 陈国兴,陈继华,等. 地震动输入界面的选取对深软场地地震效应的影响[J]. 世界地震工程, 2005, **21**(2):36 - 43. (CHEN Guo-xing, CHEN Ji-hua, et al. A study on the influence of seismic wave inputing interface on the earthquake response of deep soft sites[J]. Word Earthquake Engineering, 2005, **21**(2):36 - 43. (in Chinese))
- [10] 薄景山,翟庆生,等. 基于土层结构的场地分类方法[J]. 地震工程与工程振动, 2004, **24**(4): 46 - 49. (BO Jing-shan, ZHAI Qing-sheng, et al. Site classification method based on soil layer construction[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, **24**(4): 46 - 49. (in Chinese))
- [11] 陈国兴,陈继华. 软弱土层的厚度及埋深对深厚软弱场地地震效应的影响[J]. 世界地震工程, 2004, **20**(3): 66 - 73. (CHEN Guo-xing, CHEN Ji-hua. The effect of depth and thickness of soft soil layer on earthquake response for deep soft sites[J]. Word Earthquake Engineering, 2004, **20**(3):66 - 73. (in Chinese))
- [12] 钱胜国. 软土夹层地基场地土层地震反应特性的研究[J]. 工程抗震, 1994, **1**:32 - 36. (QIAN Shen-guo. A study on earthquake response properties of soil with weak intercalation[J]. Earthquake Resistant Engineering, 1994, **1**: 32 - 36. (in Chinese))
- [13] 张 萍,蒋秀琴,等. 爆破、矿震与地震的波谱差异[J].地震地磁观测与研究,2005,**26**(3):24 - 34.(ZHANG Ping, JIANG Xiu-qin, et al. The differences of wave spectrum among explosion, mine tremor and earthquake[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2005, **26**(3): 24 - 34. (in Chinese))
- [14] 黄忆龙. 爆破地震波及其传播特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000. (HUANG Yi-long. Researches on the blasting seismic wave and the wave propagation characters[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2000. (in Chinese))