

不同地震波输入机制下的结构振动台模型试验

康 帅, 楼梦麟, 殷 琳

(同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 设计了一个10层框架结构, 直接置于振动台上进行模型试验. 讨论不同输入机制对结构地震反应的影响. 在进行了土层自由场、土-结构相互作用体系的振动台试验的基础上, 选择三种试验记录作为该模型结构振动台试验的台面输入, 分别为先期试验中的振动台输入、自由场试验中的地表记录、土-结构相互作用体系试验中模型结构基础上测得的记录. 把试验结果与土-结构相互作用体系的试验结果作对比, 讨论不同输入模式的合理性. 试验结果表明: 不考虑土层因素, 直接将基岩波作为输入, 与实际误差最大, 将自由场的反应作为输入时误差有所减小, 而将土-结构体系基础上的反应作为输入时结构反应与实际情况更为接近, 但有时会低估结构的反应.

关键词: 振动台模型试验; 土-结构相互作用; 地震动输入; 输入机制

中图分类号: TU 317

文献标识码: A

Different Input Mechanism of Seismic on Shaking Table Test

KANG Shuai, LOU Menglin, YIN Lin

(State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A ten-story frame structure is designed for shaking table model test and the influence of different input mechanisms on the seismic responses of the structure are discussed. Based on the free-field tests and soil-structure interaction tests, three waves are selected and used as shaking table model test inputs. They are records used in the former tests, the soil's surface records obtained from the free-field tests and the foundation response of soil-structure interaction tests respectively. A comparative study is made of the results with those obtained from soil-structure interaction system and a discussion is held on the reasonableness of the different input mechanisms. The test results show that if the bedrock wave is used as input without considering the soil factor, the

maximum error may occur; when free field waves are used as input, the error may reduce; if the time history record at the foundation in the soil-structure system test is used as input, the structure response will be much closer to the soil-structure interaction system, but sometimes the structural response may be underestimated.

Key words: shaking table model test; soil-structure interaction; ground motion input; input mechanism

近年来, 结构抗震设计理论得到了快速发展, 但对于地震动输入的研究仍然存在着很大的不确定性, 存在着精确的结构分析方法与粗略的设计地震动输入之间的矛盾. 这种落后状况从整体上制约了工程抗震安全性评价的可靠性和精度. 如何采用合理地地震动输入方式对结构进行地震反应分析且便于工程实践应用, 是摆在广大学者和工程技术人员面前的难题. 在我国现行的抗震设计规范^[1]中, 对结构的抗震设计均没有要求考虑土-结构的相互作用. 通常在计算结构地震反应时, 往往把结构直接置于刚性地基上, 在结构底部输入地震动, 按四类场地分类选择输入地震波, 有较大的随意性. 一般来说, 结构基底的地震动输入采用与结构所在场地相近的类似场地地震记录, 即所谓自由场输入. 一些模型试验和数据分析结果^[2-7]表明, 土-结构相互作用会对结构基底地震动产生一定的影响. 早期, 陈清军^[8-9]曾对不同基础形式下的地震动输入做了研究, 重点探讨了桩承结构的有效地震动输入, 并对大型结构物的地震动输入问题提出了建议. 杨柏坡^[10-11]通过建立结构-场地一体化模型, 论证了影响高层建筑等效输入地震动的主要因素, 并说明了在结构地震反应分析中应考虑土-结构相互作用的影响. 李英民通过

收稿日期: 2011-04-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90915011); 科技部国家重点实验室基础研究项目(SLDRCE08-A-07)

第一作者: 康 帅(1983—), 男, 博士生. 主要研究方向为土-结构动力相互作用. E-mail: 0710020121@tongji.edu.cn

通讯作者: 楼梦麟(1947—)男, 教授, 博士生导师, 工学博士. 主要研究方向为工程结构抗震与防灾、土-结构动力相互作用等.

E-mail: lml@tongji.edu.cn

对带深桩基础的高层结构的计算分析,得出常规输入法总体偏于安全的结论^[12-13];虽然基本可行,但可能低估结构底部几层的地震反应,应注意.随着抗震研究的越来越精细化及抗震环节在结构设计中重要性的凸显,如何选择结构基底合理的地震动输入^[14],对于结构的设计非常的重要.

在本试验之前,已经完成了土层自由场的振动台模型试验和土-结构相互作用体系的振动台模型试验,从上述试验中分别记录了土层地表中心点的地震反应时程和模型结构基础中心点的地震反应记录.前者相当于自由场地震动时程,后者为实际地震中结构底部的地震动时程.这些时程记录将作为本研究的振动台输入的加速度时程.下面通过振动台模型试验,比较几种不同输入机制下结构反应的特点和差异.

1 模型试验设计

1.1 模型结构与材料特性

本试验原型为带桩筏基础的 10 层框架结构,结构的尺寸、弹性模量、密度和时间相似比分别为 1/20, 1/4, 1 和 0.1, 层高为 20 cm, 柱和梁的尺寸分别为 4 cm×4 cm 和 3 cm×4 cm, 楼板厚度为 1 cm, 选用微粒混凝土及镀锌钢丝制作, 其中微粒混凝土弹性模量 $E=7\,500\text{ MPa}$, 密度 $\rho=1\,933\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. 图 1 为模型结构置于振动台上的照片和测点布置示意图.

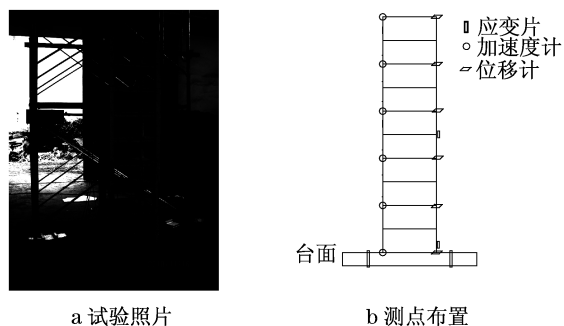


图 1 试验模型结构及测点布置

Fig.1 Test model structure and measuring points

1.2 振动台性能

本试验在同济大学土木工程防灾国家重点实验室进行,试验装置为由美国 MTS 公司生产的三向六自由度模拟地震振动台.其主要性能参数如下:台面尺寸为 4.0 m×4.0 m;最大承载重量为 25 t; X, Y, Z 三向台面最大加速度分别为 1.2, 0.8 和 0.7 g;工作频率范围为 0.1~50 Hz.

1.3 振动台输入地震波

振动台地震输入包括以下三种情况:

(1) 先期已完成的自由场和土-结构相互作用体系振动台试验时的台面水平输入,简称“基岩波”.

选择了 El Centro 波、Taft 波、上海人工基岩波作为构造试验输入地震波的母波,经过压缩后作为台面输入,分别简称为 Er 波、Tr 波、Sr 波,时程及频谱特性如图 2 所示,加速度 a 的峰值调整为 0.15 g, f, t, A 分别表示频率、时间、傅里叶谱值.

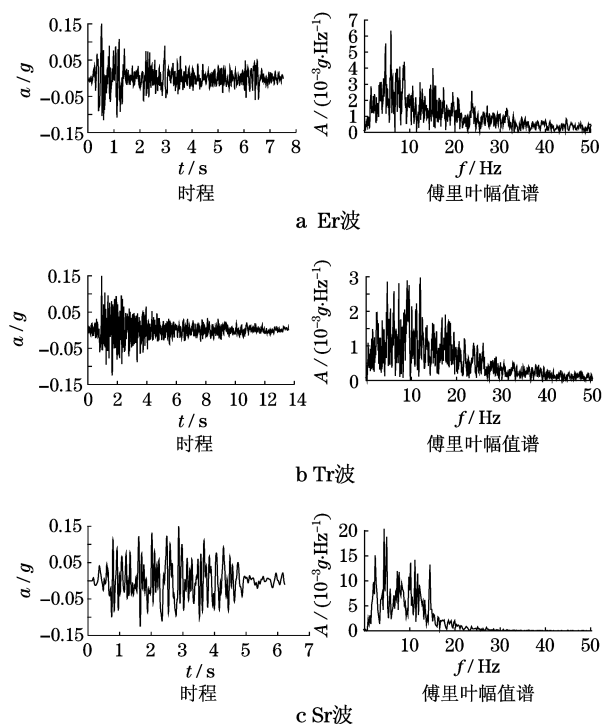


图 2 基岩波时程及其 Fourier 幅值谱

Fig.2 Time history and corresponding Fourier spectrum of rock waves

(2) 自由场振动台模型的地表加速度反应记录,简称“地表波”.在土层自由场振动台模型试验中,当振动台水平输入峰值为 0.15 g 的 3 条“基岩波”时,所得土层表面的水平加速度记录分别用 Ef, Tf, Sf 表示,它们的时程及频谱情况如图 3 所示,此时这 3 条“地表波”的峰值已不完全相同,分别为 0.192, 0.215, 0.332 g. 经对自由场的白噪声扫描,可知土层第 1 阶自振频率为 2.15 Hz.

(3) 土-结构相互作用体系结构基础处的水平加速度反应记录,简称为“基础波”.在土-结构振动台模型试验中,当振动台水平输入峰值为 0.15 g 的 3 条基岩波时,所得结构基础处的水平加速度记录分别用 Eb, Tb, Sb 表示,它们的时程及频谱情况如图 4 所示.此时,这 3 条“基础波”的峰值分别为 0.271 g,

0.223 g, 0.270 g. 经过白噪声扫描, 可知土-结构相互作用体系以结构振动为主的第1阶振型对应的自振频率为5.1 Hz.

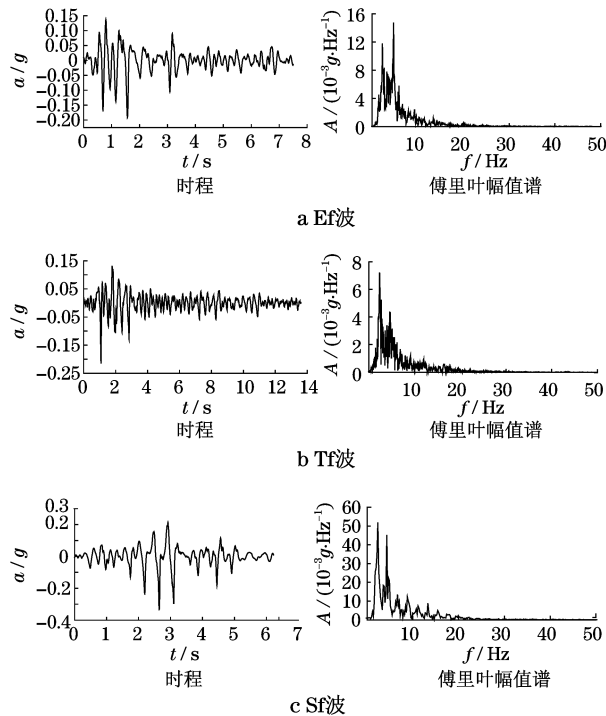


图3 地表波时程及其 Fourier 幅值谱
Fig.3 Time history and corresponding Fourier spectrum of soil surface

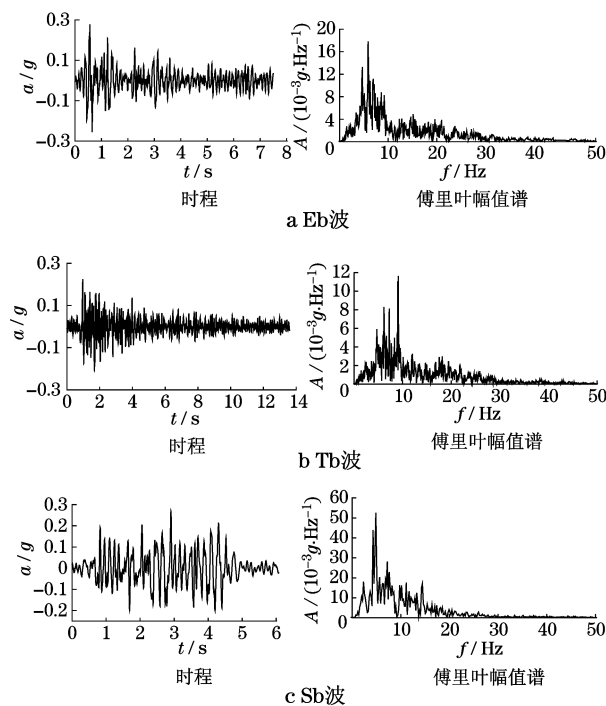


图4 基础波时程及其 Fourier 幅值谱
Fig.4 Time history and corresponding Fourier spectrum of foundation wave

通过对比图2,3,4,可发现基岩波的频率较高,而经过土层过滤后的自由场表面波的频率较低,而基础上的反应频率则介于二者之间.

1.4 输入机制设计

为了比较不同输入机制对结构地震反应的影响,把模型结构直接置于振动台上进行试验,如图1所示. 试验所用模型结构与土-结构相互作用体系试验中的上部模型结构完全相同. 设计了下列四种振动台的地震输入工况:

(1) 输入工况1 水平输入“基岩波”,即把3条所选择的Er波、Tr波、Sr波直接由振动台水平输入,相应于把结构直接置于基岩上的实际情况.

(2) 输入工况2 水平输入修正的“基岩波”,即把3条“基岩波”的峰值由0.15 g分别调整到与对应的“地表波”相等峰值,分别称为Erf波、Trf波、Srf波,峰值分别为0.192 g, 0.215 g, 0.332 g. 这一输入工况不直接试验,由输入工况1的试验结果来推算.

(3) 输入工况3 水平输入“地表波”,即把Ef波、Tf波、Sf波直接由振动台水平输入. 此输入工况相应于目前研究工作中常用的结构地震反应分析中的输入方法,也就是直接用自由场地震记录作为结构底部输入,而不考虑土-结构相互作用的影响.

(4) 输入工况4 水平输入“基础波”,即把Eb波、Tb波、Sb波直接由振动台水平输入,此输入工况相应于考虑了土-结构之间的运动相互作用,而忽略了土-结构之间的动力相互作用影响.

1.5 试验成果的比较基准

为了讨论上述三种输入机制下结构反应的合理性,以土层-模型结构相互作用体系的振动台试验(简称输入工况5)结果作为比较基准.

1.6 试验工况设计

根据试验目的,设计了如表1所示的水平激励工况表,其中“地表波”和“基础波”的幅值与图3、图4相对应.

2 试验成果分析

2.1 白噪声激励试验结果分析

在每一工况的试验结束后,都对试验模型结构进行了观察,并未发现裂缝. 说明试验过程中模型结构没有宏观破坏现象. 第一次和最后一次白噪声扫描试验中分别得到的框架顶部加速度传递函数见图5a, b. 采用半功率谱方法得到的结构频率都为6.5 Hz, 阻尼比分别为0.049, 0.050. 二者非常接近, 说明此试验过程中结构处于线弹性阶段, 没有损坏.

表 1 试验工况表
Tab.1 Table of test cases g

试验工况 序号	激励	加速度峰值	
		设定值	实测值
1	白噪声 1	0.050	—
2	Er 波	0.150	0.141
3	Tr 波	0.150	0.157
4	Sr 波	0.150	0.162
5	白噪声 2	0.050	—
6	Ef 波	0.192	0.203
7	Tf 波	0.215	0.197
8	Sf 波	0.332	0.345
9	白噪声 3	0.050	—
10	Eb 波	0.271	0.274
11	Tb 波	0.223	0.236
12	Sb 波	0.270	0.257
13	白噪声 4	0.050	—

2.2 试验波激励数据整理方法

由于试验中振动台面不可能完全实现预想的加速度输入,需要整理试验数据,以便比较分析不同的试验成果.由于本试验中模型结构处于线性工作状态,使得测试数据比例调整成为可能.在数据整理

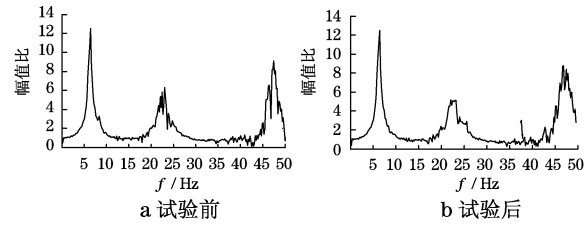


图 5 框架顶部传递函数

Fig.5 Transfer function at top-story of the frame

中,当振动台实际输入峰值与设计峰值不一致时,按这 2 个值之比对试验数据按同比例调整.

2.3 试验数据成果

现将调整后各试验波作用下的结构加速度、层间位移、框架柱应变峰值分别列于表 2—10 中,所列相对误差的计算方法为:(输入工况 i 的反应峰值 - 输入工况 5 的反应峰值) ÷ 输入工况 5 的反应峰值 ($i = 1, 2, 3, 4$).由于在土-结构相互作用体系的试验过程中第 6 层的加速度计出现问题,没有获得相应的试验记录,在表中以“—”表示.缺少了该层加速度反应的比较基准,无法计算相对误差.

表 2 E 组波作用下各层加速度峰值及误差分析

Tab.2 Peak acceleration of each floor and error analysis under excitation of E group waves

测点	Er 波		Erf 波		Ef 波		Eb 波		相互作用体系峰值/ g
	峰值/ g	误差/%	峰值/ g	误差/%	峰值/ g	误差/%	峰值/ g	误差/%	
10 层	0.534	-63.0	0.684	-52.6	0.552	-61.8	1.715	18.9	1.443
8 层	0.411	-62.8	0.526	-52.4	0.447	-59.6	1.305	18.0	1.105
6 层	0.360	—	0.461	—	0.416	—	1.258	—	—
4 层	0.387	-44.9	0.495	-29.5	0.341	-51.5	1.197	70.3	0.703
2 层	0.275	-35.0	0.352	-16.8	0.213	-49.7	0.803	89.8	0.423
基础	0.150	-44.6	0.192	-29.2	0.192	-29.2	0.271	0.0	0.271

表 3 T 组波作用下各层加速度峰值及误差分析

Tab.3 Peak acceleration of each floor and error analysis under excitation of T group waves

测点	Er 波		Erf 波		Ef 波		Eb 波		相互作用体系峰值/ g
	峰值/ g	误差/%	峰值/ g	误差/%	峰值/ g	误差/%	峰值/ g	误差/%	
10 层	0.356	-70.1	0.510	-57.2	0.736	-38.2	1.286	8.0	1.191
8 层	0.271	-73.9	0.388	-62.6	0.574	-44.7	0.955	-8.0	1.038
6 层	0.230	—	0.330	—	0.445	—	1.030	—	—
4 层	0.235	-57.3	0.337	-38.9	0.392	-29.0	0.816	48.0	0.551
2 层	0.181	-48.8	0.259	-26.7	0.214	-39.5	0.460	30.1	0.354
基础	0.150	-32.6	0.215	-3.6	0.215	-3.6	0.223	0.0	0.223

从表 2~表 4 中数据可看出,上述四种输入机制下的结构地震反应与土-结构相互作用体系的地震反应相比,都有较大的误差.相比之下,当不考虑土层情况时,即基岩输入(工况 1)与实际情况(工况 5)相差最大,原因之一是输入加速度峰

值要小于其他输入工况;当把输入峰值调整到与自由场输入相同(即工况 2)时,误差水平有所降低,要略好于自由场输入(工况 3),但 Tf 波作用下结构的反应较 Trf 波更接近于土-结构相互作用体系的反应,主要是 Trf 波的频率较高,与相互

作用体系基础上的反应 Tb 相差较大;采用“基础 相互作用体系试验成果(工况 5)的接近程度相对好波”作为输入(工况 4)时,结构反应与土-结构相 一些.

表 4 S 组波作用下各层加速度峰值及误差分析

Tab. 4 Peak acceleration of each floor and error analysis under excitation of S group waves

测点	Sr 波		Srf 波		Sf 波		Sb 波		相互作用体系峰值/g
	峰值/g	误差/%	峰值/g	误差/%	峰值/g	误差/%	峰值/g	误差/%	
10 层	0.541	-63.5	1.197	-19.1	0.732	-50.6	1.185	-20.0	1.481
8 层	0.457	-62.4	1.011	-16.7	0.653	-46.3	0.903	-25.6	1.214
6 层	0.329	—	0.728	—	0.588	—	0.700	—	—
4 层	0.277	-60.6	0.613	-12.8	0.565	-19.5	0.650	-7.5	0.703
2 层	0.208	-50.5	0.460	9.6	0.449	6.8	0.422	0.4	0.420
基础	0.150	-44.5	0.332	23.0	0.332	23.0	0.270	0.0	0.270

表 5 E 组波作用下各层层间位移峰值及误差分析

Tab. 5 Peak inter-story drift of each floor and error analysis under excitation of E group waves

测点	Er 波		Erf 波		Ef 波		Eb 波		相互作用体系峰值/mm
	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	
10 层	0.410	-43.2	0.524	-27.3	0.265	-63.2	0.774	7.3	0.721
8 层	0.728	-64.6	0.931	-54.8	0.636	-69.1	1.491	-27.6	2.059
6 层	0.913	-57.6	1.169	-45.8	0.799	-62.9	1.870	-13.2	2.155
4 层	0.599	-59.5	0.766	-48.1	0.489	-66.9	1.260	-14.7	1.476
2 层	0.849	-53.1	1.086	-39.9	1.328	-26.6	1.125	-37.8	1.808

表 6 T 组波作用下各层层间位移峰值及误差分析

Tab. 6 Peak inter-story drift of each floor and error analysis under excitation of T group waves

测点	Tr 波		Trf 波		Tf 波		Tb 波		相互作用体系峰值/mm
	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	
10 层	0.215	-66.6	0.308	-52.2	0.454	-29.6	0.634	-1.6	0.645
8 层	0.506	-71.2	0.725	-58.7	1.039	-40.8	1.302	-25.8	1.755
6 层	0.666	-66.6	0.955	-52.2	1.259	-36.9	1.657	-17.0	1.997
4 层	0.425	-71.9	0.609	-59.7	0.730	-51.7	1.082	-28.4	1.511
2 层	0.767	-45.0	1.099	-21.1	1.049	-24.8	0.885	-36.5	1.394

表 7 S 组波作用下各层层间位移峰值及误差分析

Tab. 7 Peak inter-story drift of each floor and error analysis under excitation of S group waves

测点	Sr 波		Srf 波		Sf 波		Sb 波		相互作用体系峰值/mm
	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	峰值/mm	误差/%	
10 层	0.364	-62.4	0.807	-16.8	0.569	-41.3	0.727	-25.0	0.970
8 层	0.759	-67.1	1.681	-27.3	1.138	-50.8	1.280	-44.7	2.312
6 层	1.054	-56.2	2.332	-3.1	1.304	-45.8	1.782	-26.0	2.407
4 层	0.565	-64.8	1.250	-22.0	0.689	-57.0	1.021	-36.3	1.603
2 层	0.904	-51.5	2.001	7.3	2.268	21.5	1.143	-38.7	1.866

表 8 E 组波作用下框架柱应变峰值及误差分析

Tab. 8 Peak strain of frame column and error analysis under excitation of E group waves

测点	Er 波		Erf 波		Ef 波		Eb 波		相互作用体系峰值/ 10^{-6}
	峰值/ 10^{-6}	误差/%	峰值/ 10^{-6}	误差/%	峰值/ 10^{-6}	误差/%	峰值/ 10^{-6}	误差/%	
中部	73.0	-77.8	93.4	-71.5	77.1	-76.5	244.6	-25.5	328.3
底部	224.2	-52.0	287.0	-38.6	207.0	-55.7	527.4	12.8	467.5

表 9 T 组波作用下框架柱应变峰值及误差分析

Tab. 9 Peak strain of frame column and error analysis under excitation of T group waves

测点	Tr 波		Trf 波		Tf 波		Tb 波		相互作用体系峰值/ 10^{-6}
	峰值/ 10^{-6}	误差/%	峰值/ 10^{-6}	误差/%	峰值/ 10^{-6}	误差/%	峰值/ 10^{-6}	误差/%	
中部	51.5	-84.5	73.8	-77.8	102.2	-69.3	212.0	-36.3	332.9
底部	134.1	-66.5	192.2	-51.9	305.6	-23.6	467.4	16.9	399.8

表 10 S 组波作用下框架柱应变峰值及误差分析

Tab. 10 Peak strain of frame column and error analysis under excitation of S group waves

测点	Sr 波		Srf 波		Sf 波		Sb 波		相互作用体系峰值/ 10^{-6}
	峰值/ 10^{-6}	误差/%	峰值/ 10^{-6}	误差/%	峰值/ 10^{-6}	误差/%	峰值/ 10^{-6}	误差/%	
中部	82.6	-82.3	182.8	-60.9	134.6	-71.2	176.3	-62.3	467.0
底部	274.3	-46.1	607.1	19.3	302.5	-40.5	487.3	-4.2	508.9

当采用“基础波”输入时,在试验波 Eb 和试验波 Tb 作用下,结构的加速度反应要大于工况 5 作用下的情况,即当考虑土-结构相互作用时,由于土体阻尼的耗能,使得反应减小;顶部几层加速度反应和实际情况的误差要小于底部几层的,这可能是结构的不同振动形态所致.而在试验波 Sb 作用下情况相反,从图 2“基岩波”的频谱图中可看出,试验波 Sr 的频率较低,卓越频率为 5 Hz,刚好与土-结构系统的 1 阶频率接近,故土-结构相互作用体系下的反应要大一些.从表 5~7 中可看出,层间位移具有相似的规律,都是工况 4 时较为接近于实际情况,各工况下层间位移都要小于土-结构相互作用时的值.表 8—10 的应变峰值表现出同样的规律,但框架中间柱的应变与实际情况的误差要大于底部的,且均小于土-结构相互作用时的情况.由于篇幅限制,仅列出为 E 组波作用下,各不同输入机制下框架顶层的加速度时程反应及傅里叶幅值谱,见图 6.

3 结论

(1) 对于土层基础上的建筑结构,当不考虑土层影响时,将地震波直接从结构基底输入,无论采用何种方式,都有较大误差,与结构实际的地震反应相差较大.

(2) 相比之下,不考虑土层因素时,直接将基岩波作为输入,与实际误差最大;当将基岩波峰值调整至与地表波峰值相同时,在基岩波频率较低时,较地表波的输入更接近于实际情况些;但当地震波频率较高时,则是地表波的输入更接近实际些;将土-结构体系基础上的反应作为输入,与实际情况最为接近.

(3) 当采用基础上的反应作为输入简化计算时,结果有时大于土-结构相互作用体系试验所得的反

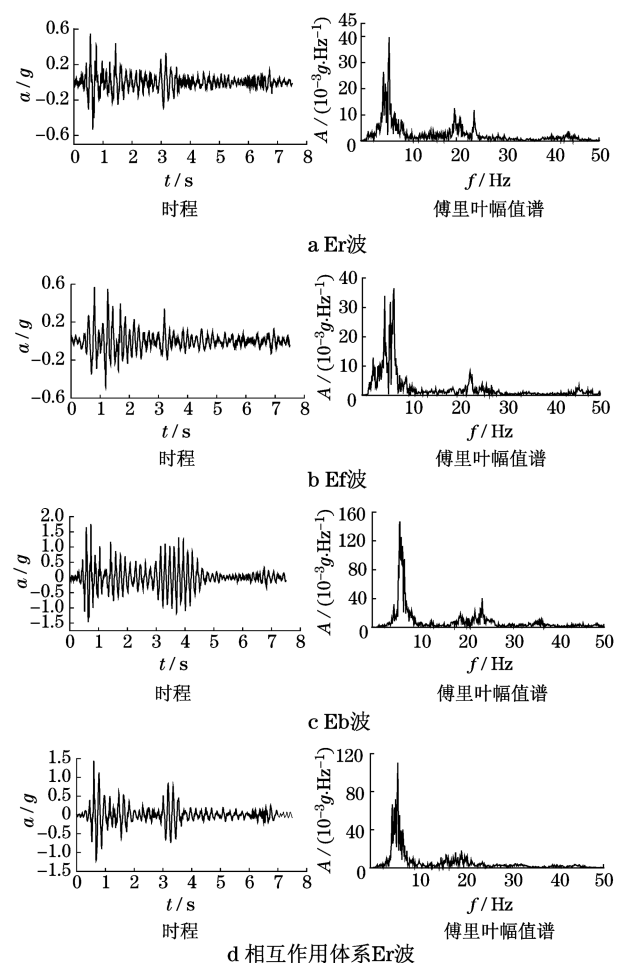


图 6 框架顶层的水平加速度

Fig. 6 Horizontal acceleration at top-story of the frame

应值;对于低频地震波来说,由于土-结构相互作用使结构的频率降低,采用不考虑土-结构相互作用时的简化计算,将会低估结构的反应.

(4) 在不考虑土-结构相互作用下的各种输入机制时,层间位移均小于实际情形下的层间位移.

(5) 当不考虑土-结构相互作用时,结构中部的应变较实际情形小,应变与实际情况的误差要大于底部的误差。

参考文献:

- [1] 中国建筑科学研究院. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
China Academy of Building Research. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [2] 韩飞. 考虑土层非线性的土-桩-结构动力相互作用研究[D]. 上海:同济大学土木工程学院,2007.
HAN Fei. Soil-pile-structure dynamic interaction when considering nonlinear soil [D]. Shanghai: Tongji University. College of Civil Engineering, 2007.
- [3] 陈跃庆,吕西林,陈波. 结构-地基动力相互作用对基底地震动的影响[J]. 结构工程师, 2001(2): 14.
CHEN Yueqing, LV Xilin, CHEN Bo. effects of soil-structure interaction on foundation motion[J]. Structural Engineers, 2001(2): 14.
- [4] 楼梦麟,宗刚,牛伟星,等. 土-桩-钢结构相互作用体系的振动台模型试验[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 226.
LOU Menglin, ZONG Gang, NIU Weixing. Shaking table model test of soil-pile-steel structure interaction system [J]. Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 2006, 26(5): 226.
- [5] 陈跃庆,吕西林,李培振,等. 不同土性的 SSI 对基底地震动的影响[J]. 武汉大学学报:工学版, 2005, 38(3): 63.
CHEN Yueqing, LV Xilin, LI Peizhen. Effects of soil-structure interaction with various soils[J]. Journal of Wuhan University: Engineering and Technology Edition, 2005, 38(3): 63.
- [6] 王志华,刘汉龙,陈国兴,等. 土-结构相互作用效应对结构基底地震动影响的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(3): 132.
WANG Zhihua, LIU Hanlong, CHEN Guoxing, et al. Experiment study on effects of dynamic soil-structure interaction on foundation motions of structures[J]. Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 2005, 25(3): 132.
- [7] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京:科学出版社,2007.
CHEN Guoxing. Geotechnical earthquake engineering [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [8] 陈清军,赵云峰,王汉东. 不同基础形式下的结构地震动输入研究[J]. 工程力学, 2001(增刊): 219.
CHEN Qingjun, ZHAO Yunfeng, WANG Handong. Study on ground motion input about different foundation type [J]. Engineering Mechanics, 2001(suppl): 219.
- [9] 陈清军,翁大根,朱合华. 确定桩承高层结构有效地震动输入的一种改进模型[J]. 工程力学, 1996(A02): 305.
CHEN Qingjun, WENG Dagen, ZHU Hehua. A kind of modified model about effective ground motion input of pile-supported high-rise structure [J]. Engineering Mechanics, 1996(A02): 305.
- [10] 杨柏坡,孙茂斌,杨笑梅. 关于高层建筑的地震动输入[J]. 建筑科学, 1999, 15(3): 6.
YANG Baipo, SUN Maobin, YANG Xiaomei. Seismic motion input for high-rise buildings [J]. Building Science, 1999, 15(3): 6.
- [11] 杨柏坡,窦立军. 地震安全性评价和高层建筑的地震动输入[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(1): 35.
YANG Baipo, DOU Lijun. Seismic safety evaluation and input of earthquake ground motion for tall buildings [J]. Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 2000, 20(1): 35.
- [12] 韩军. 带深桩基础高层建筑结构地震动输入问题研究[D]. 重庆:重庆大学土木工程学院,2004.
HAN Jun. Study on ground motion input for seismic design of tall buildings with deep pile foundation [D]. Chongqing: Chongqing University. College of Civil Engineering, 2004.
- [13] 姬淑艳,韩军,李英民,等. 带深桩基础高层建筑结构的地震动输入问题[J]. 地震工程与工程振, 2006, 26(5): 231.
JI Shuyan, HAN Jun, LI Yingmin. Study on ground motion excitation for seismic design of tall buildings with deep pile foundation [J]. Earthquake Engineering And Engineering Vibration, 2006, 26(5): 231.
- [14] 解振涛,张俊发,高永昭,等. 高层建筑结构的输入地震动问题探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2007, 33: 62.
XIE Zhen tao, ZHANG Junfa, GAO Yongzha, et al. Some discussion on input seism on tall building[J]. Sichuan Building Science, 2007, 33: 62.