

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.05.010

地基土对设备-结构体系能量反应影响分析

罗兰芳¹, 姜南^{1,2}, 毕继红^{1,2}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 为了分析地基土对设备-结构体系能量反应的影响规律, 开展了设备-结构体系振动台试验与设备-结构-地基土相互作用体系实时子结构振动台试验, 对比以刚性地基为假设的设备-结构体系与考虑地基土影响后的设备-结构体系能量反应发现: 考虑地基土影响后设备与结构的累积总输入能大幅度减小, 且地基土可改变设备与结构总输入能在时间上的分布特性。由试验结果根据相似关系反推原型设备-结构体系的能量反应表明, 基于刚性地基假设的设备-结构体系能量反应可能存在较大误差, 因此在设备-结构体系分析中应当考虑地基土的影响。

关键词: 分枝模态子结构; 设备-结构体系; 土-结构体系; 地震能量反应; 振动台试验; 实时子结构试验
中图分类号: TK317 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2020)05-0446-07

Effect analysis of soil on the energy response of equipment-structure system

LUO Lanfang¹, JIANG Nan^{1,2}, BI Jihong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of Coastal Civil Engineering Structure and Safety (Tianjin University),
Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: To investigate the effects of soil on the seismic energy response of the equipment-structure system, the shaking table test and the real-time substructure shaking table test of an equipment-structure-soil system were carried out in this study. The energy response of the equipment-structure system in the case of rigid ground was compared with those of considering the effects of soil. The input energy of the equipment-structure system was found to decrease significantly due to the effects of soil. Furthermore, the effect of soil led to a change in the time distribution characteristics of total energy input. Additionally, the energy response of the original equipment-structure system was also deduced based on the similitude scale factors, which resulted in significant errors compared with those of considering the effects of soil. Therefore, it is imperative to pay an attention to the effects of soil in the design of equipment-structure systems.

Key words: branch modal substructure; equipment-structure system; soil-structure system; seismic energy response; shaking-table test; real-time substructure test

随着社会的发展, 建筑结构中设备等非结构构件日趋增多, 所形成的设备-结构体系逐渐引起研究者的关注^[1-2]。目前关于设备-结构体系研究大部分是基于刚性地基的假设, 有关地基土对设备-结构体系地震反应的影响研究尚处于起步阶段^[3]。对于设备-结构-地基土体系, 如何考虑部件之间复杂的相互作用、有效地计算各部分的反应, 是研究设备与结构真实抗震性能的前提。

地震对结构体系作用的本质是能量的输入、传递、转化和耗散。研究表明, 地震动能输入^[4]及其在时

基金项目: 国家自然科学基金 (51478312)
作者简介: 罗兰芳 (1988—), 女, 博士研究生, 主要从事土与结构相互作用研究。E-mail: lanfangluo@tju.edu.cn
通信作者: 毕继红, 教授。E-mail: jihong_bi@163.com
引用本文: 罗兰芳, 姜南, 毕继红. 地基土对设备-结构体系能量反应影响分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 446-452.
LUO Lanfang, JIANG Nan, BI Jihong. Effect analysis of soil on the energy response of equipment-structure system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 446-452.

间轴上的分布特性^[5-6]对结构体系的地震反应有重要影响,从累积输入能与瞬时输入能的角度可以较好地把握结构体系地震响应。对于设备-结构-地基土体系,在地震作用下,体系内部地基土与上部结构^[7-10]、结构与设备之间均存在动态能量交换^[11],因而从能量的角度分析一方面可洞察地震动对体系性能的影响,另一方面可以深入了解相互作用机理,合理反映地震作用下设备-结构体系的真实性能。然而目前此方面研究较少见于报道。

本文基于分枝模态子结构法推导设备-结构-地基土相互作用体系运动方程,并导出设备与结构各自的能量反应方程。以两自由度设备-钢框架结构-地基土相互作用模型作为研究对象,开展了设备-结构体系振动台模型试验和设备-结构-地基土相互作用体系实时子结构振动台试验,研究地基土对设备-结构体系能量反应的影响规律,并由模型试验结果反推原型体系反应,得到一些有益的规律。

1 设备-结构-地基土相互作用体系运动方程以及能量反应方程

基于分枝模态子结构法原理推导设备-结构-地基土相互作用体系的运动方程,经变换后可适用于该体系实时子结构试验,并导出了设备与结构单独的能量反应计算方程。

1.1 运动方程

设备-结构-地基土相互作用体系包括设备、结构和地基土三部分,按照分枝模态子结构方法将如图 1 (a)中设备-结构-地基土相互作用体系划分成变形互不重叠的 3 个分枝,包括:(a)图 1 (b)中分枝 d,即弹性地基上的刚性结构-刚性设备体系;(b)图 1 (c)中分枝 s,即刚性地基上的结构-刚性设备体系;(c)图 1 (d)中分枝 e,即刚性地基上的刚性结构-设备体系。

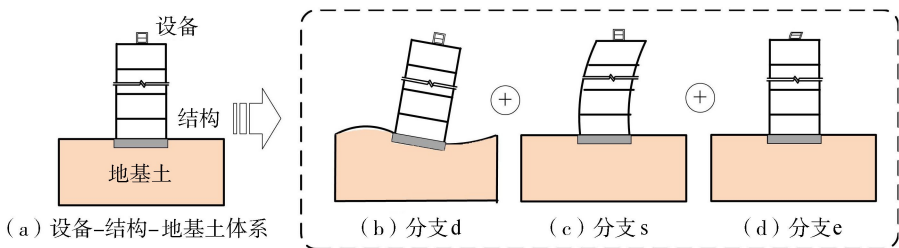


图 1 设备-结构-地基土相互作用体系运动方程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of equation of motion for the equipment-structure-soil system

分枝 d 的特征方程以及由 m 阶模态组成的分枝 d 的模态变换矩阵 Φ_d 为

$$k_d \phi_d = \lambda_d m_d \phi_d \quad \Phi_d = (\phi_{d1}, \phi_{d2}, \dots, \phi_{dm}) \tag{1}$$

式中: k_d ——分枝 d 中地基土的刚度矩阵; m_d ——分枝 d 中地基土的质量矩阵; ϕ_d ——分枝 d 中地基土的模态向量; λ_d ——分枝 d 中地基土的模态特征值。

分枝 d 模态变换后的计算矩阵为

$$u_d = \Phi_d q_d \quad \tilde{k}_d = \Phi_d^T k_d \Phi_d \quad \tilde{m}_d = \Phi_d^T m_d \Phi_d \quad \tilde{c}_d = \Phi_d^T c_d \Phi_d \quad \tilde{f}_d = \Phi_d^T f_d \tag{2}$$

式中: u_d ——分枝 d 中地基土的位移坐标; q_d ——分枝 d 中地基土的模态坐标; c_d ——分枝 d 中地基土的阻尼矩阵; f_d ——分枝 d 中地基土的荷载矩阵。各矩阵顶部加“~”表示经模态变换后的变量,可通过截取合适的地基土振型和频率阶数来达到满足精度要求下缩减地基土计算规模的目的^[12-13]。

对设备和结构,由于其自由度较少且考虑非线性因素,采用完整的计算特性矩阵。结构的位移 u_s 由两部分组成,一是图 1 (b)中地基土位移引起结构的刚体位移,二是图 1 (c)中结构本身的位移 q_s :

$$u_s = R_{sd} \Phi_d q_d + q_s \tag{3}$$

式中: R_{sd} ——分枝 d 中结构的刚体模态,可由分枝 d 中地基土变形产生的结构刚体位移求得。

设备的位移 u_e 由三部分组成,一是图 1 (b)中地基土位移引起的设备刚体位移,二是图 1 (c)中结构位移引起的设备刚体位移,三是图 1 (d)中设备本身的位移 q_e :

$$u_e = R_{ed} \Phi_d q_d + R_{es} q_s + q_e \tag{4}$$

式中: R_{ed} ——分枝 d 中设备的刚体模态,可由分枝 d 中地基土变形产生的设备刚体位移求得; R_{es} ——分枝 s 中设备的刚体模态,可由分枝 s 中结构变形产生的设备刚体位移求得。

将地基土、结构、设备位移的关系写成矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_s \\ u_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_d & O & O \\ R_{sd}\Phi_d & I & O \\ R_{ed}\Phi_d & R_{es} & I \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据分枝模态子结构方法原理整理得到设备-结构-地基土相互作用体系的运动方程,并将方程中地基土与结构的耦合项 $m_s R_{sd} \Phi_d$ 、地基土与设备的耦合项 $m_e R_{ed} \Phi_d$ 、结构与设备的耦合项 $m_e R_{es}$ 等移动到方程的右边,以荷载的面貌出现,从而得到地基土、结构、设备考虑相互作用后各自的运动方程:

$$\tilde{m}_d \ddot{q}_d + \tilde{c}_d \dot{q}_d + \tilde{k}_d q_d = \tilde{f}_d - \Phi_d^T R_{sd}^T m_s \ddot{q}_s - \Phi_d^T R_{ed}^T m_e \ddot{q}_e \quad (6)$$

$$m_s \ddot{q}_s + c_s \dot{q}_s + k_s q_s = f_s - m_s R_{sd} \Phi_d \ddot{q}_d - R_{es}^T m_e \ddot{q}_e \quad (7)$$

$$m_e \ddot{q}_e + c_e \dot{q}_e + k_e q_e = f_e - m_e R_{ed} \Phi_d \ddot{q}_d - m_e R_{es} \ddot{q}_s \quad (8)$$

式中: m_s ——分枝 s 中结构的质量矩阵; c_s ——分枝 s 中结构的阻尼矩阵; k_s ——分枝 s 中结构的刚度矩阵; m_e ——分枝 e 中设备的质量矩阵; c_e ——分枝 e 中设备的阻尼矩阵; k_e ——分枝 e 中设备的刚度矩阵; f_s ——结构的荷载矩阵; f_e ——设备的荷载矩阵; q_s ——结构相对于地面的位移; q_e ——设备相对于所在楼层的位移。

1.2 能量反应方程

根据前述结构与设备各自的运动方程计算相应的能量反应,将两者运动方程左、右边分别对各自位移 dq_s 、 dq_e 在 $0 \sim t_0$ 时间内积分可得到各自的能量反应方程:

$$\int_0^{t_0} \dot{q}_s^T m_s \ddot{q}_s dt + \int_0^{t_0} \dot{q}_s^T c_s \dot{q}_s dt + \int_0^{t_0} \dot{q}_s^T k_s q_s dt = \int_0^{t_0} \dot{q}_s^T (f_s - m_s R_{sd} \Phi_d \ddot{q}_d - R_{es}^T m_e \ddot{q}_e) dt \quad (9)$$

$$\int_0^{t_0} \dot{q}_e^T m_e \ddot{q}_e dt + \int_0^{t_0} \dot{q}_e^T c_e \dot{q}_e dt + \int_0^{t_0} \dot{q}_e^T k_e q_e dt = \int_0^{t_0} \dot{q}_e^T (f_e - m_e R_{ed} \Phi_d \ddot{q}_d - m_e R_{es} \ddot{q}_s) dt \quad (10)$$

方程(9)(10)右边项分别为考虑地基土影响后结构的总输入能 E_{IS} 和设备的总输入能 E_{IE} 。刚性地基时设备和结构的能量反应可通过去掉各方程右侧地基土影响项得到。

引入瞬时输入能来表征设备与结构能量输入在时间轴上的分布特性。考虑结构或设备经历半次振动循环的时间(从 t 到 $t+\Delta t$),因而得到结构和设备各自的瞬时输入能 ΔE_s 和 ΔE_e 分别如下:

$$\Delta E_s = \int_t^{t+\Delta t} \dot{q}_s^T (f_s - m_s R_{sd} \Phi_d \ddot{q}_d - R_{es}^T m_e \ddot{q}_e) dt \quad (11)$$

$$\Delta E_e = \int_t^{t+\Delta t} \dot{q}_e^T (f_e - m_e R_{ed} \Phi_d \ddot{q}_d - m_e R_{es} \ddot{q}_s) dt \quad (12)$$

由于瞬时输入能峰值可以体现地震动加载过程中各时间步长 Δt 中能量输入最大强度,后文中采用结构和设备的瞬时输入能峰值作为分析对象,分别用符号 ΔE_{smax} 和 ΔE_{emax} 表示。

2 试验概况

研究数据来源于设备-结构体系振动台试验(有、无地基土两种情况)。其中无地基土时设备-结构体系振动台试验为常规振动台模型试验,而带有地基土时的体系试验采用实时子结构试验方法^[14-16]进行。试验缩尺模型来源于天津地区三类场地土上一栋附有设备的 4 层钢框架结构,为了保证缩尺模型在物理过程和地震反应上与原结构相似,同时考虑到振动台载荷、吊装要求等,选定长度、应力、加速度这 3 个物理量的相似常数为可控相似常数,三者相似比分别取为 0.2、1、1,以此可以推导其余物理量的相似比。

试验钢框架结构采用截面尺寸为 100 mm×45 mm×6 mm×8 mm 的 H 型钢制作,除第一层高度为 0.68 m 外,其余各层高度均为 0.63 m,结构纵、横向跨度均为 1.6 m,结构第 1 层到第 3 层的总质量均为 1700 kg,第 4 层的总质量为 1540 kg。结构材料的弹性模量与屈服强度分别为 202.0 GPa 和 339.6 MPa。设备模拟放置于结构顶层的通信设备并简化成两自由度模型,设备采用圆形钢管加工制成,钢管外径为 28 mm,壁厚为 5 mm。设备层高为 0.25 m,每层施加配重至 90 kg,设备材料的弹性模量与屈服强度分别为 192.0 GPa 和 421.4 MPa。

土体模型埋深按照长度相似比 0.2 确定,土体总尺寸为 30 m×15 m×15 m,埋置基础尺寸为 2.2 m×2.2 m×0.4 m,模型土体其余设计参数按照文献[17]所推荐的卓越周期相似比设计方法确定]模型土体卓越周期相

似比为 0.45,根据卓越周期比计算公式得到等效剪切波速相似比约为 0.45,进一步可调整模型土体的设计参数使其等效剪切波速符合要求。模型土体和基础参数见表 1。

试验时采用适合三类场地的地震动:El Centro、Tianjin 和人工波 Artificial(图 2),按照 8 度设防要求,小震、中震阶段各地震动加速度幅值分别调幅到 0.7 m/s^2 和 2.0 m/s^2 。考虑到试验框架结构将应用于其他研究,试验时未涉及大震工况。

表 1 基础与土体参数

Table 1 Material parameters of the foundation and soil

类型	深度/m	泊松比	弹性模量/Pa	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
基础	0.4	0.25	3.52×10^{10}	2650
土层 1	3.6	0.35	2.11×10^7	1730
土层 2	8.4	0.35	5.64×10^7	1950
土层 3	3.0	0.35	3.37×10^8	2030

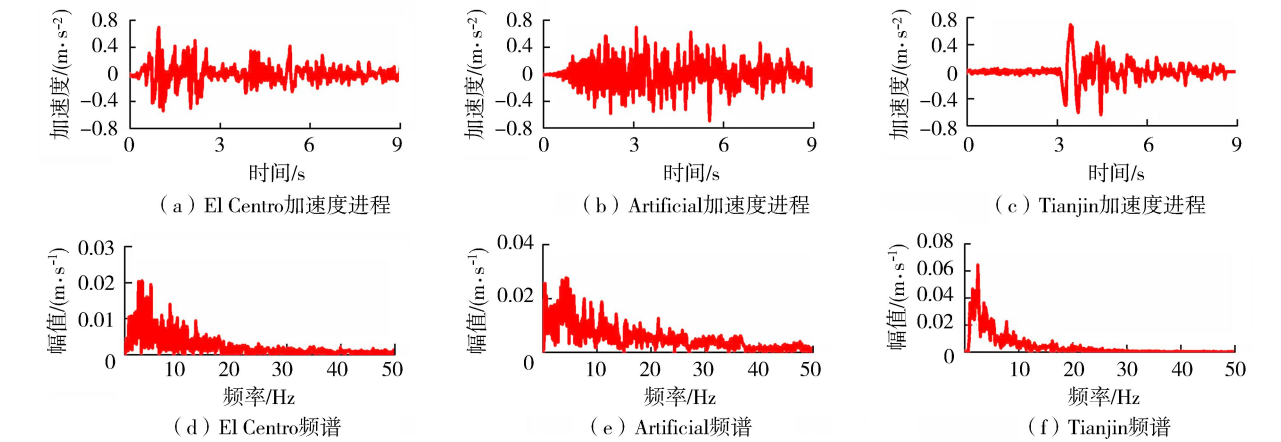


图 2 地震动时程曲线及傅里叶频谱

Fig. 2 Acceleration time history curves and Fourier spectra of three seismic waves

3 试验结果

将设备与结构模型分别简化为两自由度模型和四自由度剪切模型,根据试验采集加速度经滤波、积分处理得到相应速度与位移,按前述公式求得设备与结构的输入能反应。由于中震阶段设备与结构输入能反应图形与小震阶段趋势类似,故中震阶段设备与结构的输入能反应仅用表格值表示(如表 2 中所示为设备-结构体系各工况下的总输入能和最大瞬时输入能值)。

表 2 设备-结构体系输入能反应参数

Table 2 Input energy responses of the equipment-structure system

地震类型	$A_{ce}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	不考虑地基土				考虑地基土			
		总输入能/J		瞬时输入能/($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)		总输入能/J		瞬时输入能/($\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$)	
		E_{IS}	E_{IE}	ΔE_{smax}	ΔE_{emax}	E_{IS}	E_{IE}	ΔE_{smax}	ΔE_{emax}
EL	0.7	39.44	0.64	10.47	1.20	7.88	0.29	7.74	0.89
	2.0	307.95	4.02	79.38	8.01	138.70	2.59	63.88	5.99
AF	0.7	7.62	0.94	9.44	0.52	4.86	0.71	9.83	0.48
	2.0	87.74	6.86	71.91	3.82	70.89	6.24	56.42	3.15
TJ	0.7	107.53	1.11	45.65	2.26	31.29	0.39	35.99	1.54
	2.0	914.22	6.37	361.64	11.91	454.27	3.34	294.41	8.49

注: A_{ce} 表示试验时振动台原始输入地震动加速度峰值,EL、AF 和 TJ 分别表示 El Centro、Artificial 和 Tianjin 地震动。

3.1 结构输入能

对比有、无地基土时结构的输入能可知:(a)考虑地基土影响后结构的总输入能呈减小趋势,不同地震动作用下减小幅度不同,由于地基土的影响使结构总输入能相对于刚性地基时减小幅度总体在 20% ~ 80% 之间。(b)结构瞬时输入能峰值总体呈减小趋势,但在地震动强度 0.7 m/s^2 Artificial 波作用下有、无地基土时结构的瞬时输入能峰值变化不大。此外,通过对比不同地震动强度有、无地基土时结构的输入能,可发现随着地震动强度增加,地基土对结构的能量反应影响作用削弱。

图 3 所示为小震阶段结构输入能反应。可知,考虑地基土影响后不仅使结构总输入能减小,而且使结构

在整个地震动加载阶段的输入能更易衰减。值得注意的是,在 El Centro 和 Tianjin 地震动加载的后半时段,结构的总输入能曲线变得更为光滑、平稳,而在人工波 Artificial 地震动加载的后半时段结构输入能值虽减小了,但输入能时程体现出该时段结构能量输入的变化更为剧烈,产生此现象的原因可能是由于 3 条地震动的频谱特性不同所致。

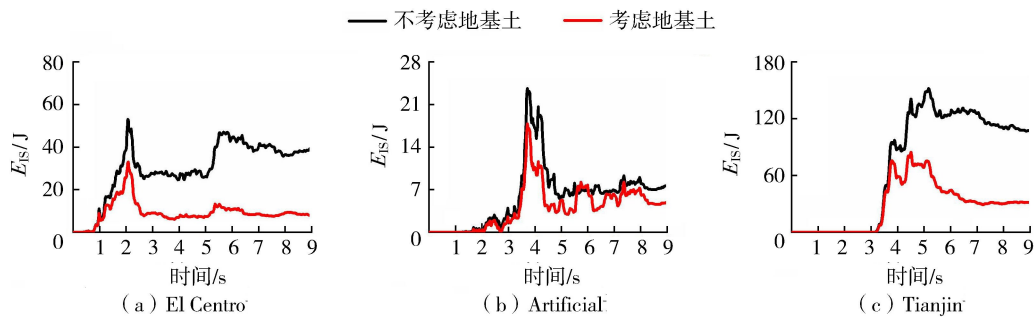


图3 地震动强度 0.7 m/s^2 时 3 条地震动作用下结构总输入能反应时程

Fig.3 Input energy responses of the structure at an input PGA of 0.7 m/s^2 under three seismic waves

由图 2 中可以看出:人工波 Artificial 与 El Centro、Tianjin 地震动频谱差异明显,人工波具有相对较多的高频成分,频率成分的差异使土体对结构在 3 条地震动下的能量反应影响出现了差别。以上现象进一步表明土体对结构能量反应的影响依赖于地震动特性。

3.2 设备输入能

从表 2 可知:地基土对设备的输入能影响与结构相似,因土体加入引起设备的累积输入能终值减小幅度在 10% ~60% 之间,设备的最大瞬时输入能也呈减小趋势,幅度稍小时在 10% ~30% 之间,同时也可看出地基土对设备输入能反应的影响随地震动强度的增加而减小。

图 4 为小震阶段设备的输入能反应。对比 3 条地震动加载时段内有、无土体时设备的输入能反应,发现考虑地基土影响后设备的总输入能时程曲线变得更加平稳,相应的瞬时输入能强度也被削弱。与结构类似,设备在人工波 Artificial 加载的后半时段也出现了能量输入变化更剧烈的现象,表明地基土对设备能量反应的影响也依赖于地震动特性。

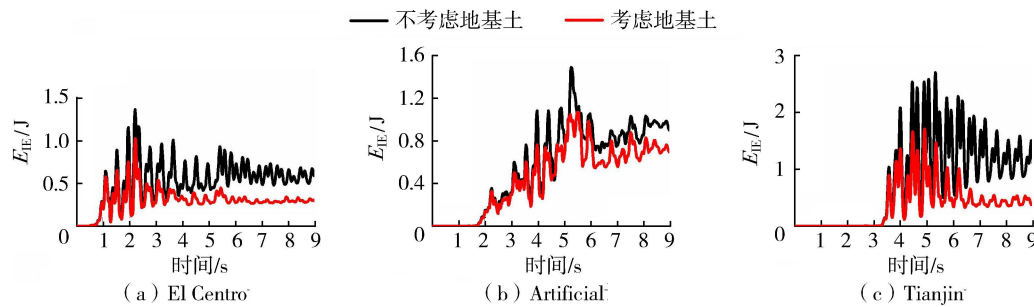


图4 地震动强度 0.7 m/s^2 时 3 条地震动作用下设备总输入能反应时程

Fig.4 Input energy responses of the equipment at an input PGA of 0.7 m/s^2 under three seismic waves

4 设备-结构原型体系反应

根据模型相似比可以反推出原型结构的动力特性和反应,同时为了验证推算值的正确性,在 ANSYS 中建立了原型设备-结构-土体系模型。表 3 为试验模型频率、原型推测频率和原型计算频率值,可知推测值与计算值误差在 3% 以内,表明试验模型可以真实地模拟原型结构的动力特性。

由于振动台输入加速度和输出加速度之间

表3 设备-结构原型体系频率信息

Table 3 Frequency characteristics of the original equipment-structure system

类型	结构频率/Hz			设备频率/Hz	
	1 阶	2 阶	3 阶	1 阶	2 阶
试验测值	2.3809	7.0536	11.3130	4.5852	30.0670
原型推测值	1.0629	3.1489	5.0504	2.0469	13.4228
原型计算值	1.0647	3.1543	5.0591	2.0506	13.4460

相差不大,直接由相似比反推原型体系的反应^[18],将模型体系能量反应时程曲线的横坐标除以时间相似比进行放大,纵坐标按照能量相似比放大可得到原型能量反应时程推测值。原型体系各工况总输入能反应终值如表 4 所示。根据模型反应推测结果与 ANSYS 结果对比,设备与结构输入能反应计算值与推测值误差在 5% 以内,由此可知模型试验的能量反应结果可以较准确地预测原型体系的能量反应。

表 4 设备-结构体系原型模型总输入能反应

Table 4 Input energy responses of the original equipment-structure system

类型	$A_{cc}/(m \cdot s^{-2})$	不考虑地基土总输入能/J				考虑地基土总输入能/J			
		E_{IS}	E_{IS}	E_{IE}	E_{IE}	E_{IS}	E_{IS}	E_{IE}	E_{IE}
		推测值	计算值	推测值	计算值	推测值	计算值	推测值	计算值
EL	0.7	4992.41	4827.66	81.01	79.23	997.47	966.55	36.71	36.01
	2.0	38981.01	37772.60	508.86	496.65	17556.96	17030.25	327.85	321.29
AF	0.7	964.56	926.94	118.99	116.25	615.19	591.81	89.87	87.99
	2.0	11106.33	10750.93	868.35	850.12	8973.42	8713.19	789.87	772.50
TJ	0.7	13611.39	12958.05	140.51	136.85	3960.76	3786.49	49.37	48.28
	2.0	115724.05	110516.47	806.33	786.17	57502.53	55259.93	422.78	414.75

对比原型设备-结构体系在有、无土体下的总输入能值,发现在 El Centro 和 Tianjin 地震动下体系总输入能差异最明显,结构和设备的总输入能在考虑地基土影响后减小幅度分别在 50% ~ 80% 和 40% ~ 60% 之间,表明刚性地基假设体系总输入能在某些工况下与实际值之间存在较大误差,因而在设备-结构体系设计中应考虑地基土的影响。

5 结 论

- a. 基于分枝模态子结构法原理推导的设备-结构-地基土相互作用体系运动方程,过程简洁直观,并能够减少地基土的冗余自由度,提高计算效率且满足子结构试验要求。
- b. 基于分支模态子结构方法得到相互作用体系中设备与结构各自的能量反应计算方程,以耦合项荷载的能量体现相互作用体系内部能量的交换,为复杂相互作用体系的能量研究奠定基础。
- c. 根据振动台试验结果,地基土对模型设备-结构体系输入能反应有明显影响,考虑地基土影响后将改变模型设备-结构体系输入能的大小及时间上的分布特性,由模型试验结果反推原型设备-结构体系反应,表明有、无土体体系能量反应差异明显,因而在设备-结构体系设计中考虑地基土的影响更符合实际。

参考文献:

[1] 李杰,陈淮,孙增寿. 结构-设备动力相互作用试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(1):157-161. (LI Jie, CHEN Huai, SUN Zengshou. Shaking table tests on spatial structure-equipment model systems[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(1): 157-161. (in Chinese))

[2] MEDINA R A, SANKARANARAY R, KINGSTON K M. Floor response spectra for light components mounted on regular moment-resisting frame structures[J]. Engineering Structures, 2006, 28(14):1927-1940.

[3] CHAUDHURI S R, GUPTA V K. Mode acceleration approach for generation of floor spectra including soil-structure interaction [J]. Journal of Earthquake Technology, 2003, 40:99-115.

[4] AKIYAMA H. Earthquake-resistant limit-state design for buildings[M]. Tokyo: University of Tokyo Press,1985:33-38.

[5] NAKAMURA T, HORI N, INOUE N. Evaluation of damaging properties of ground motions and estimation of maximum displacement based on momentary input energy[J]. Journal of Structural and Construction Engineering, 1998, 63:65-72.

[6] HORI N, INOUE N. Damaging properties of ground motions and prediction of maximum response of structures based on momentary energy response[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2002, 31(9):1657-1679.

[7] TAKEWAKI I. Bound of earthquake input energy to soil-structure interaction systems[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2005, 25(7):741-752.

[8] GAJAN S, SARAVANATHIIBAN D S. Modeling of energy dissipation in structural devices and foundation soil during seismic loading[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(8):1106-1122.

[9] 于旭,庄海洋,朱超. 基于模型试验的软夹层地基与刚性地基上隔震结构体系耗能特性分析[J]. 振动与冲击, 2016, 35(10):73-82. (YU Xu, ZHUANG Haiyang, ZHU Chao. Analysis on the energy dissipation of isolated structures on rigid

foundation and soft interlayer soil foundation based on model test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(10):73-82. (in Chinese))

[10] 李志全, 杜成斌, 艾亿谋. 地基辐射阻尼对结构地震响应的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2009, 37(4):400-404. (LI Zhiquan, DU Chengbin, AI Yimou. Effect of radiation damping on seismic response of structures[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2009, 37(4):400-404. (in Chinese))

[11] 谭平, 李祥秀, 刘良坤, 等. 巨-子结构控制体系的减震机理及性能分析[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11):55-63. (TAN Ping, LI Xiangxiu, LIU Liangkun, et al. Control mechanism and performance analysis of a mega-sub structure control system[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11):55-63. (in Chinese))

[12] LI Yue, JIANG Xinliang. Parametric analysis of eccentric structure-soil interaction system based on branch mode decoupling method[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 48(6):63-70.

[13] 韩冰, 陈少林, 梁建文. 结构-土-结构动力相互作用对结构系统频率的影响[J]. 地震工程学报, 2019, 41(6):1574-1580. (HAN Bing, CHEN Shaolin, LIANG Jianwen. Effects of structure-soil-structure dynamic interaction on the frequency of structural systems[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6):1574-1580. (in Chinese))

[14] NAKASHIMA M, KATO H, TAKAOKA E. Development of real-time pseudo dynamic testing[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21(1):779-792.

[15] 唐贞云, 陈适才, 张金喜, 等. 基于振动台的实时动力子结构实验系统稳定性预测研究[J]. 工程力学, 2016, 33(12):217-224. (TANG Zhenyun, CHEN Shicai, ZHANG Jinxi, et al. Study on the stability prediction of real-time dynamic substructuring system based on shaking table[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(12):217-224. (in Chinese))

[16] 姜忻良, 徐炳伟, 李竹. 土-桩-结构振动台模型试验相似理论及其实施[J]. 振动工程学报, 2010, 23(2):225-229. (JIANG Xinliang, XU Bingwei, LI Zhu. Similitude laws and its application in shaking table test of soil-pile-structure interaction system[J]. Journal of Vibration Engineering, 2010, 23(2):225-229. (in Chinese))

[17] 姜忻良, 张崇祥, 姜南, 等. 设备-高层结构-地基土体系交互计算方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(5):433-439. (JIANG Xinliang, ZHANG Chongxiang, JIANG Nan, et al. Interactive numerical calculation method of equipment-high rise structure-soil system[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(5):433-439. (in Chinese))

[18] 杨树标, 李荣华, 刘建平, 等. 振动台试验模型和原型相似关系的理论研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2007, 24(1):8-11. (YANG Shubiao, LI Ronghua, LIU Jianping, et al. Theoretical study on similarity relation of vibroplatform test model and original mold [J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Sciences), 2007, 24(1):8-11. (in Chinese))

(收稿日期:2019-01-28 编辑:高建群)

• 简讯 •

第八届中国水生态大会将在郑州召开

为深入学习贯彻习近平总书记关于长江流域、黄河流域生态保护的重要讲话精神,强化河湖治理体系和治理能力建设,持续改善水生态环境,建设幸福河湖,促进人水和谐共生,由河海大学联合生态环境部黄河流域生态环境监督管理局、华北水利水电大学、中国自然资源学会水资源专业委员会共同举办的“第八届中国水生态大会”将于2020年10月29—31日在郑州召开。

会议征文主题:①长江大保护与绿色发展;②黄河流域生态保护和高质量发展;③幸福河湖、智慧河湖建设;④河长制湖长制;⑤流域截污减排与水环境保护;⑥水生态环境保护与修复;⑦水系统规划与水景观设计;⑧黑臭水体综合治理;⑨河湖治理典型解决方案和应用案例。

(本刊编辑部供稿)