

Simulation Study of Shaking Table Substructure Test Based on Force Controlled AMD Device

Pengli Cong, Jinbao Ji*

Beijing Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing
Email: congpengli@outlook.com, jinbaoking@gmail.com

Received: Mar. 29th, 2018; accepted: Apr. 23rd, 2018; published: Apr. 30th, 2018

Abstract

Aiming at the problem of complex loading mode and low control precision in real time substructure test, this paper puts forward the interface force compatibility condition of numerical substructure and experimental substructure by AMD device, which can reduce the test cost and simplify the loading mode. High precision control is carried out by force feedback to improve the pertinence and research efficiency of the experiment. The results of analysis and simulation show that the proposed method of substructure test based on AMD force control is feasible and effective.

Keywords

Real-Time Substructure Test, Shaking Table Test, Active Mass Driver, Force Control

基于力控制AMD的振动台子结构试验仿真研究

丛鹏里, 纪金豹*

北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京
Email: congpengli@outlook.com, jinbaoking@gmail.com

收稿日期: 2018年3月29日; 录用日期: 2018年4月23日; 发布日期: 2018年4月30日

摘要

针对实时子结构试验加载方式复杂, 控制精度低的问题, 本文提出通过AMD装置进行加载实现数值子结

*通讯作者。

构与试验子结构的界面力相容条件, 降低试验造价, 简化加载方式。通过力反馈进行高精度控制, 提高试验的针对性和研究效率。分析与模拟的结果都表明, 对于所提出的基于AMD力控制的振动台子结构试验方法具有可行性与有效性。

关键词

实时子结构试验, 振动台试验, AMD, 力控制

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前结构抗震研究方法主要有拟静力试验、拟动力试验和地震模拟振动台试验。拟静力试验由于设备简单, 能够最大限度获取试件的各种信息而得到广泛的应用, 但拟静力试验无法反应结构在真实地震作用下的动力响应。振动台试验能够直接真实地反映结构在地震过程中的受力性能和破坏特征, 但由于振动台的规模、尺寸和承载能力的限制, 难以进行大比例模型或足尺结构的试验研究, 且较难满足相似条件, 易导致地震作用破坏形态失真[1]。拟动力试验技术兼具了拟静力试验和地震模拟振动台试验的特点, 降低了对加载装置的严苛要求, 而且还能够反映出结构在地震作用下的响应。特别是拟动力子结构试验技术, 可以对结构关键部位进行足尺试验, 其他部位用计算模型代替, 节约了试验费用, 从而受到越来越多研究人员的青睐。拟动力子结构试验是最早提出的子结构试验方法[2], 但是拟动力试验无法反映速度相关型材料的性能。因此拟动力子结构试验逐渐发展为快速拟动力试验, 快速拟动力试验提高了加载速率, 但仍然无法全面反映试件的速度相关性[3]-[9]。为了解决这个难题, 1992年 Nakashima [10]等人提出实时子结构试验方法, 以准确反映速度相关型试件的性能, 此后实时子结构试验逐步发展为振动台子结构试验[11] [12] [13]。

本文立足于振动台子结构试验技术, 针对现有振动台子结构试验在加载系统和控制方面所存在的问题提出了相应的解决办法。对于现有加载系统装置复杂、质量大、体积重、操作繁琐、投资多, 界面力难以获取等问题, 提出采用 AMD 主动控制装置作为数值子结构作用力的施加方式, 为了保证试验的控制精度以及提高试验预计效果, 将力控制算法用于 AMD 闭环控制中。这就是所提出的将主动质量驱动器(AMD)力控制应用于振动台子结构试验的研究设想, 通过力控制的 AMD 装置对试验子结构施加作用力, 既可提供试验所需的附加质量, 又可模拟数值子结构的动力效应, 适用于高层建筑、桥梁结构等结构形式的振动台试验。本文将从理论公式, 控制方法建模, 数值仿真结果分析来验证基于 AMD 力控制的振动台子结构试验方法的可行性。

2. 理论分析

2.1. 子结构的拆分

本部分将从加载方式和子结构拆分公式以及拆分后的相容条件展开介绍。传统的振动台子结构试验示意图如图 1 所示:

本文提出通过推动 AMD 加载装置中的质量块产生惯性力来实现数值子结构和试验子结构之间界面力。图 2 为本文提出的振动台子结构试验的加载方式。

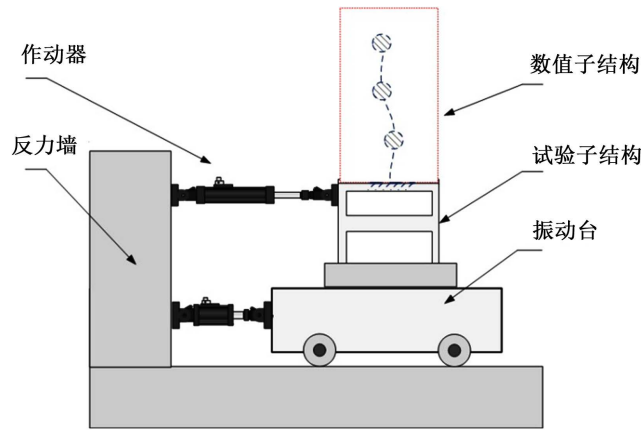


Figure 1. Schematic diagram of traditional shaking table of substructure
图 1. 传统振动台子结构示意图

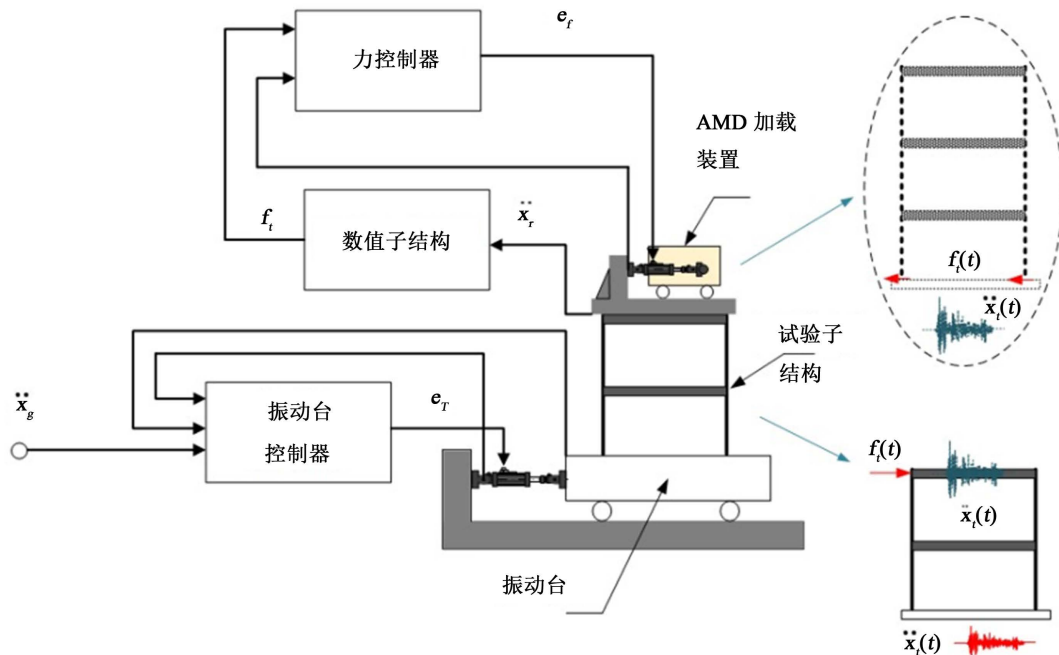


Figure 2. Schematic diagram of real-time substructure loading mode based on AMD
图 2. 基于 AMD 的实时子结构加载方式示意图

选取目标结构, 将结构划分为两部分, 一部分通常是非线性, 结构形式、动力特性复杂, 无法对其建立准确数值模型的试验子结构, 另一部分一般是线性, 结构形式、动力特性简单, 可以进行可靠数值模拟的数值子结构, 数值子结构由仿真软件模拟计算, 如图 3 所示。

2.1.1. 运动学公式

以 n 层剪切框架模型为基础, 为了减少多次积分所产生的误差, 方便各层非线性恢复力的计算以及三连续方程的表达, 本文采用相对位移来描述运动微分方程。在子结构中, 1 至 i 层为试验子结构, $i+1$ 至 n 层为数值子结构, 在试验过程中数值子结构的动力响应将会通过作动器推动试验子结构顶部的质量块来实现。整体结构和子结构运动微分方程表达式可以写成:

整体结构:

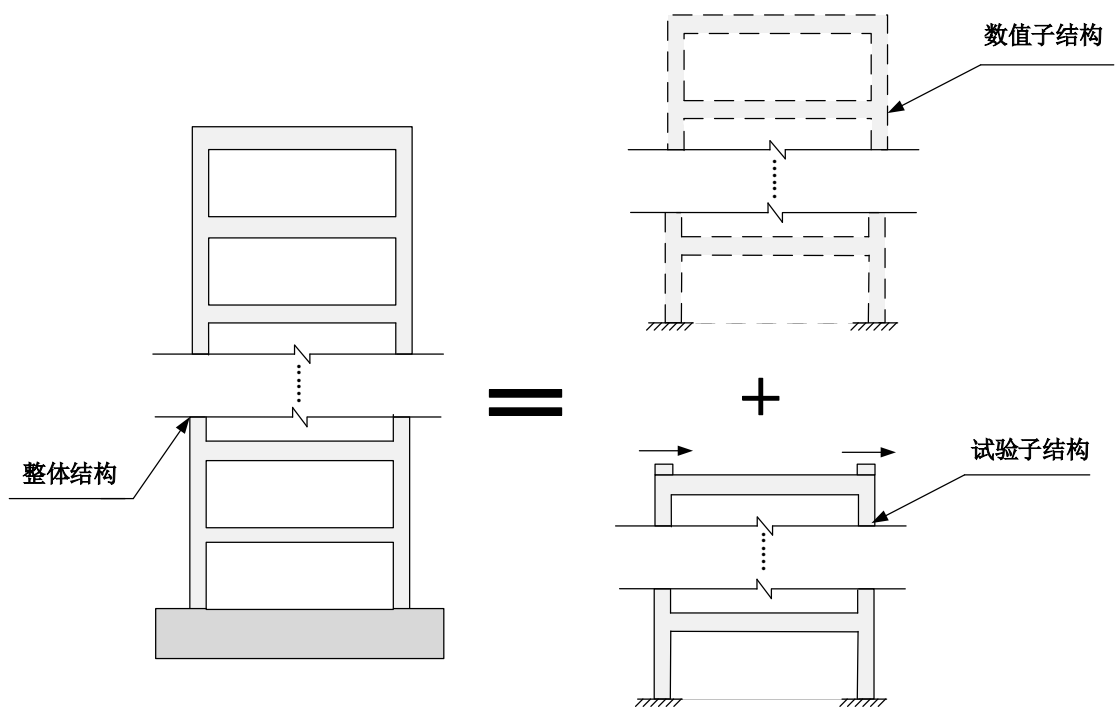


Figure 3. Substructure split diagram
图 3. 子结构拆分示意图

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 \\ -m_2 \\ -m_3 \\ \vdots \\ -m_n \end{bmatrix} \{\ddot{x}_g\} \tag{1}
 \end{aligned}$$

子结构系统:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{i-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \\ \vdots \\ \ddot{x}_{i-1} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 & 0 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 & 0 & 0 \\ 0 & -c_3 & c_3 + c_4 & -c_4 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_{i-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_{i-1} \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 & 0 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3 + k_4 & -k_4 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -k_{i-1} & k_{i-1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_{i-1} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 \\ -m_2 \\ -m_3 \\ \vdots \\ -m_{i-1} \end{bmatrix} \{\ddot{x}_g\} \tag{2}
 \end{aligned}$$

$$m_i \ddot{x}_i - (c_i \dot{x}_{i-1} + k_i x_{i-1}) + c_i \dot{x}_i + k_i x_i - f_m = -m_i \ddot{x}_g \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_{i+1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{i+2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{i+3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_{i+1} \\ \ddot{x}_{i+2} \\ \ddot{x}_{i+3} \\ \vdots \\ \ddot{x}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{i+1} + c_{i+2} & -c_{i+2} & 0 & 0 & 0 \\ -c_{i+2} & c_{i+2} + c_{i+3} & -c_{i+3} & 0 & 0 \\ 0 & -c_{i+3} & c_{i+3} + c_{i+4} & -c_{i+4} & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & c_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \vdots \\ \dot{x}_n \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} k_{i+1} + k_{i+2} & -k_{i+2} & 0 & 0 & 0 \\ -k_{i+2} & k_{i+2} + k_{i+3} & -k_{i+3} & 0 & 0 \\ 0 & -k_{i+3} & k_{i+3} + k_{i+4} & -k_{i+4} & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & -k_n & k_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_{i+1} \\ x_{i+2} \\ x_{i+3} \\ \vdots \\ x_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_{i+1} \\ -m_{i+2} \\ -m_{i+3} \\ \vdots \\ -m_n \end{bmatrix} \{ \ddot{x}_g \} \quad (4)
 \end{aligned}$$

式中 $m_i, c_i, k_i, i=1, 2, 3, \dots, n$ 分别表示对应各层结构的集中质量、层间阻尼系数和层间刚度, $x_i, \dot{x}_i, \ddot{x}_i$ 分别为对应层相对于基础或台面的位移、速度和加速度, \ddot{x}_{gc} 和 \ddot{x}_g 分别为数值子结构和试验子结构的输入加速度, f_m 表示控制质量块的惯性力, 式(2)和式(3)属于试验子结构, 式(4)属于数值子结构。

2.1.2. 相容条件

为了使子结构和整体结构具有等价的动力响应, 试验应遵循以下协调条件:

- 1) 输入进数值子结构的加速度必须是试验子结构顶层的绝对加速度:

$$\ddot{x}_{gc} = \ddot{x}_{abs} \quad (5)$$

- 2) 控制质量块的惯性力应等于数值子结构底层的剪切力:

$$f_m = R_{i+1} = c_{i+1} (\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + k_{i+1} (x_{i+1} - x_i) \quad (6)$$

2.1.3. 实施策略

试验子结构通过高强螺栓固定在地震模拟振动台上, AMD 加载装置的支座通过法兰盘或连接板与试验子结构进行连接; 各传感器根据试验设定安装在试验子结构的顶部和 AMD 加载装置上, 各传感器与计算机连接; 数值子结构利用带有采集卡的计算机或嵌入式控制器进行算法模拟, 计算得到数值子结构的动力反应和基底反力。通过力控制算法将数值子结构的计算结果转化为控制信号, 驱动 AMD 加载装置将作用力施加到试验子结构上, 同时 AMD 加载装置也提供对试验子结构的竖向重力。

3. 仿真模型的建立

3.1. 结构模型的选取

以五层剪切框架模型为基础, 其中每层的层间质量、层间刚度、层间阻尼分别为 50 kg, 97500 N/m, 241.81, 前三阶自振频率为 2 Hz, 5.84 Hz, 9.2 Hz。为了减少多次积分所产生的误差, 方便各层非线性恢复力的计算以及三连续方程的表达, 本文采用相对位移来描述运动微分方程。在子结构系统中, 底部两层作为试验子结构, 顶部三层作为数值子结构, 在试验过程中数值子结构的动力响应将会通过作动器推动试验子结构顶部的质量块来实现。

3.2. 基于电液力控制系统的建模

根据加速度峰值为 0.1 g 的阪神地震波作用下结构的层间剪力计算值和各层质量分布, 确定 AMD 的设计参数如表 1 所示, 作动器采用国内某公司的定制产品。

Table 1. Design parameters of the AMD device
表 1. AMD 装置的设计参数

指标	参数
行程	±0.12 m
工作压力	10 MPa
液压缸有效面积	$2.2. \times 10^{-4} \text{ m}^2$
液压缸有效容积	$1.2. \times 10^{-4} \text{ m}^3$
负载质量	45 kg

偏差电压信号为 $U_e = U_r - U_f$ ，式中 U_r 是指令电压信号， U_f 是反馈电压信号。力传感器的方程为 $U_f = K_{fF} F_m$ ，式中 K_{fF} 为力传感器增益， F_m 是液压缸出力。伺服阀放大器动态可以忽略，其输出电流为 $\Delta I = K_a U_e$ ，式中 K_a 为伺服放大器增益。伺服阀传递函数可以表示为 $X_v / \Delta I = K_{xv} G_{xv}(s)$ ， X_v 式中伺服阀阀芯位移， K_{xv} 伺服阀增益。

在外负载为零的情况下，负载力包含了惯性力、粘性阻尼力、弹性力，三连续方程可以由式(7)进行描述：

$$\begin{aligned} F_m &= A_p p_L(s) = (m_k s^2 + B_p + K) x_p(s) \\ Q_L(s) &= A_p s x_p(s) + \left(\frac{V_t}{4\beta_e} s + C_{tp} \right) p_L(s) \\ Q_L(s) &= k_q x_v(s) - K_c p_L(s) \end{aligned} \tag{7}$$

式中 m_k 是负载质量，即为 AMD 加载系统中的质量块， B_p 是负载阻尼系数， K 是负载弹簧刚度， C_{tp} 是液压缸总泄漏系数。 A_p 表示活塞等效截面积； Q_L 为作动器流量， V_t 表示作动器腔内全容积， β_e 为液压油体积弹性模量， k_q 表示伺服阀信号-流量增益， K_c 为流量-压力系数， x_m 为质量块的实际位移， p_L 为负载压力。

由式(7)得到电液力控制系统的传递函数图，如下图 4 所示。

根据传递函数图简化或通过式(7)中消去中间变量 Q_L 和 X_p ，可以得到以下输入与输出比值传递函数表达式(8)：

$$\frac{F_m}{U_r} = \frac{k_q K_a K_{xv} G_{xv}(s) A_p (m_k s^2 + B_p s + K)}{(m_k s^2 + B_p s + K)(As + B) + K_{fF} k_q K_a K_{xv} G_{xv}(s) A_p (m_k s^2 + B_p s + K) + A_p^2 s} \tag{8}$$

式中 $A = \frac{V_t}{4\beta_e}$ ， $B = C_{tp} + K_c$

在以上建立的数学模型中，考虑了负载的惯性、粘性摩擦负载、弹性负载，又考虑了油液的压缩性及液压缸的泄漏等影响因素，等式较为复杂。实际系统的负载通常比较简单，可以根据具体的情况进行处理，忽略一些影响因素，将传递函数进一步简化。

在液压伺服或比例控制系统中，通常遇到没有弹性负载($K = 0$)或弹性负载很小可以忽略不计，这时主要以惯性负载为主，所以不考虑弹性负载的情况是比较普遍的，由于负载阻尼系数 B_p 一般比较小，所以为了简化传递函数，将 K 和 B_p 均取零，下式为简化后的传递函数：

$$\frac{F_m}{U_r} = \frac{k_q K_a K_{xv} G_{xv}(s) A_p m_k s}{m_k s (As + B) + K_{fF} k_q K_a K_{xv} G_{xv}(s) A_p m_k s + A_p^2} \tag{9}$$

式中 $A = V_t / 4\beta_e$ ， $B = C_{tp} + K_c$ 。

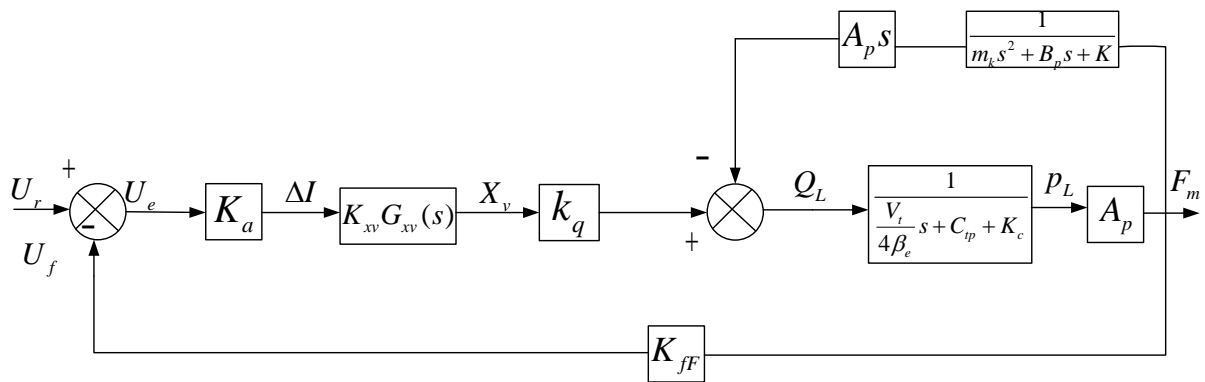


Figure 4. Transfer function diagram of electro-hydraulic force control system
图 4. 电液力控制系统传递函数图

在力控制下, 按照流程图 5、表 1 中的参数利用 Simulink 进行建模仿真, 通过控制系统分析和时频域校正选定系统最优控制参数, 系统传递函数如式(10)所示。

$$\frac{F_m}{U_r} = \frac{1.98 \times 10^{-7} s}{2 \times 10^{-12} s^2 + 1.98 \times 10^{-7} s + 4.84 \times 10^{-8}} \quad (10)$$

3.3. 基于位移控制系统的建模

为了使加载系统受控, 加入位移反馈, 形成闭环控制系统, 加入位移反馈后的控制系统如图 6 所示, 其中 K 和 B_p 均取零。

将图 6 所示的位移闭环反馈传递函数可以变型为:

$$\frac{x_m}{u} = \frac{k_q \alpha P}{As^3 + Bs^2 + A_p \alpha s + k_d k_q \alpha P} \quad (11)$$

式中 P 为比例控制参数, $A = V_t / 4\beta_e$, $B = C_{ip} + K_c$, $\alpha = A_p / m_k$ 。

在 PID 位移控制下, 按照流程图 5、表 1 中的参数利用 Simulink 进行建模仿真, 其中闭环传递函数如式(12)所示。

$$\frac{x_m}{u} = \frac{4.98 \times 10^{-6} s}{4.2 \times 10^{-14} s^3 + 7.48 \times 10^{-10} s^2 + 1 \times 10^{-9} s + 4.98 \times 10^{-6}} \quad (12)$$

分别通过数值仿真计算了整体结构的抗震反应、力控制 AMD 子结构试验和位移控制下子结构试验的结构反应。以试验子结构顶部的界面力、数值子结构的顶层位移和顶层加速度作为评价指标。利用公式

$$RM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{abs} - x_{model})^2}{n}} \quad (13)$$

计算整体结构动力反应与子结构分析的均方根误差, 分别得到基于力控制和位移控制下到的 AMD 子结构试验仿真计算结果如表 2 和表 3 所示。图 7~10 为 kobe 地震波作为试验子结构输入波作用下界面力指标的对比图, 其中层间剪力为整体结构第三层恢复力。

根据表 2 可知, 基于力控制 AMD 子结构试验的界面力、数值子结构顶层位移和数值子结构顶层加速度的均方根误差与各峰值比的最大值分别为 3.5%、3.5%和 3.2%; 综合各个工况, 计算子结构试验的

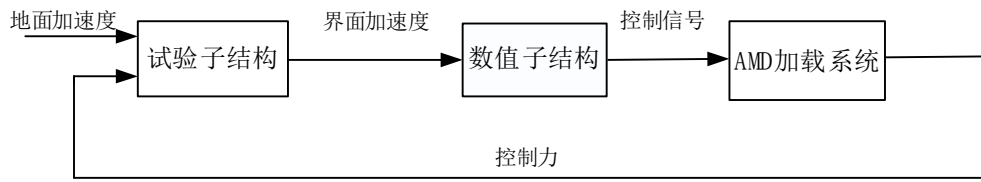


Figure 5. The flow chart of substructure test simulation
图 5. 子结构试验仿真流程图

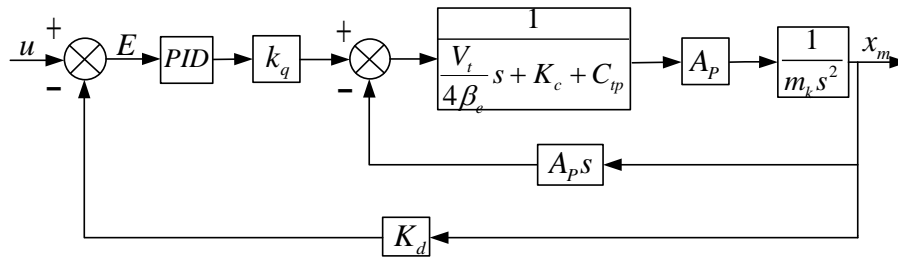


Figure 6. Transfer function diagram of system based on displacement control
图 6. 基于位移控制的系统传递函数图

Table 2. Comparison of calculative results of force control
表 2. 力控制计算结果对比

地震波	界面力(N)			数值子结构顶层位移(m)			数值子结构顶层加速度(m/s ²)		
	RM	PK	RM/PK	RM (10 ⁻⁴)	PK	RM/PK	RM	PK	RM/PK
Kobe, 1995	8.125	593.24	1.4%	3.848	0.028	1.4%	0.060	4.524	1.3%
ElCentro, 1940	8.967	510.3	1.8%	4.181	0.024	1.8%	0.067	4.205	1.6%
Taft, 1952	13.456	382.365	3.5%	6.349	0.018	3.5%	0.101	3.189	3.2%

注: 图中 RM 表示整体结构与子结构对应指标的均方根误差, PK 表示整体结构对应指标峰值, 地震波按场地类别进行排序。

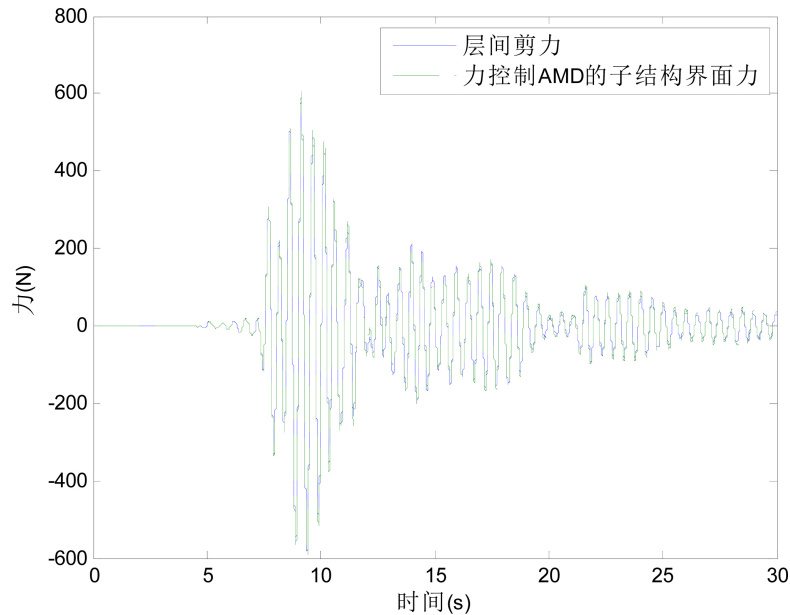


Figure 7. Comparison of interfacial forces in force controlled AMD substructure test
图 7. 力控制 AMD 子结构试验的界面力对比

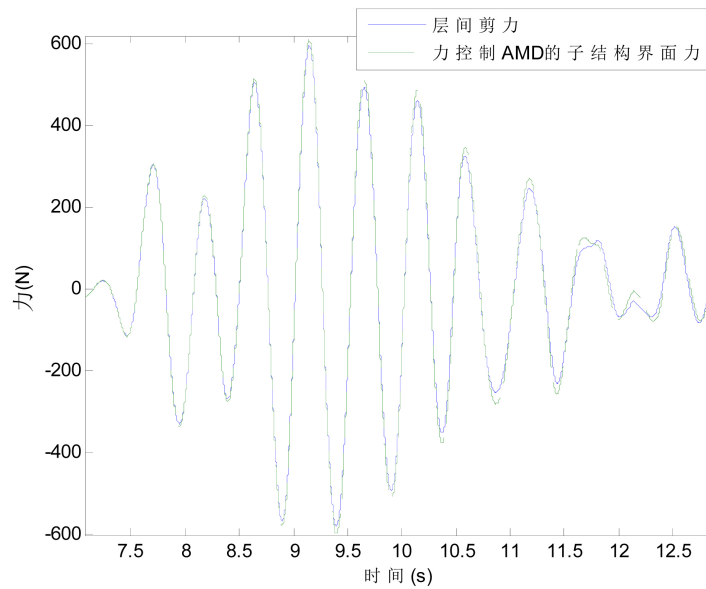


Figure 8. Comparison and amplification of interface force in force controlled AMD substructure test
图 8. 力控制 AMD 子结构试验的界面力对比放大图

Table 3. Comparison of calculative results of development control
表 3. 位移控制计算结果对比

地震波	界面力(N)			数值子结构顶层位移(m)			数值子结构顶层加速度(m/s ²)		
	RM	PK	RM/PK	RM	PK	RM/PK	RM	PK	RM/PK
Kobe,1995	20.692	593.24	4.2%	0.001	0.028	3.6%	0.182	4.524	4.0%
ElCentro,1940	33.858	510.3	6.6%	0.002	0.024	6.3%	0.224	4.205	5.3%
Taft,1952	42.020	382.365	11.0%	0.002	0.018	10.6%	0.297	3.189	9.3%

注：图中 RM 表示整体结构与子结构对应指标的均方根误差，PK 表示整体结构对应指标峰值，地震波按场地类别进行排序。

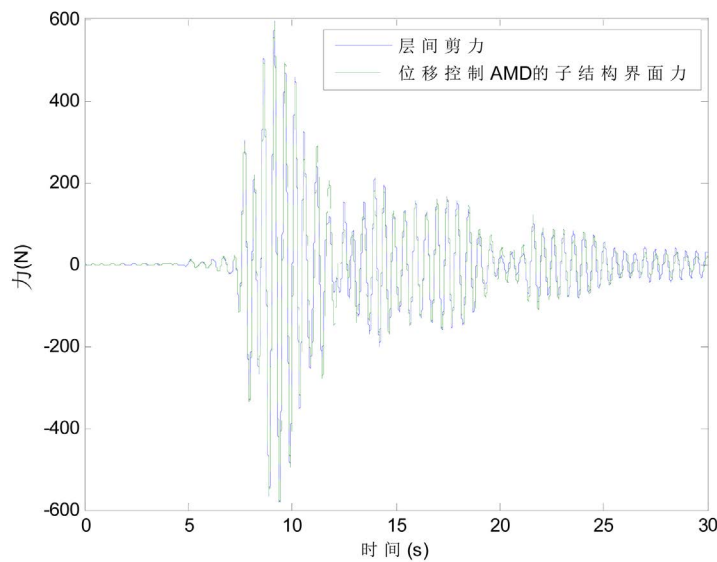


Figure 9. Comparison of interfacial forces in displacement controlled AMD substructure test
图 9. 位移控制 AMD 子结构试验的界面力对比

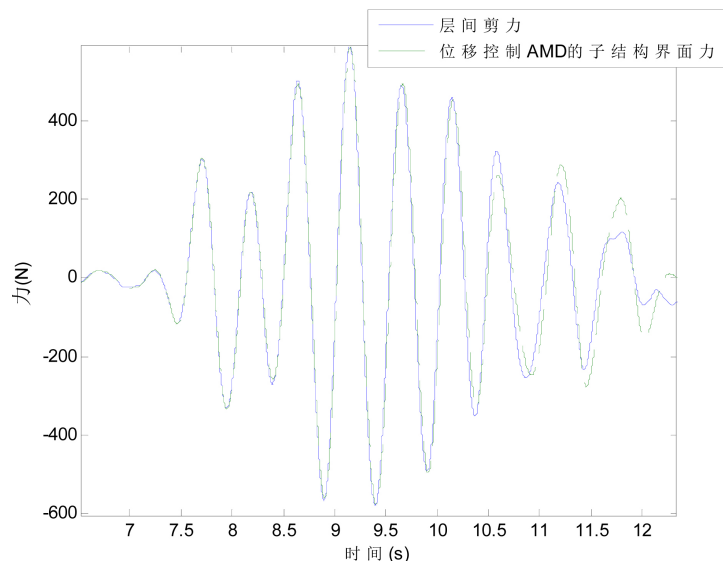


Figure 10. Comparison and amplification of interface force in displacement controlled AMD substructure test
图 10. 位移控制 AMD 子结构试验的界面力对比放大图

界面力、数值子结构顶层位移和数值子结构顶层加速度的均方根误差与各峰值比的平均值, 平均误差分别为 2.2%、2.2%和 2.0%。同样由表 3 可知, 基于位移控制 AMD 子结构试验的界面力、数值子结构顶层位移和数值子结构顶层加速度的均方根误差与各峰值比的最大值为 11.0%、10.6%和 9.3%; 子结构试验的界面力、数值子结构顶层位移和数值子结构顶层加速度的均方根误差与各峰值比的平均误差分别为 7.3%、6.8%和 6.2%; 与 PID 位移闭环控制相比, 力控制下的 AMD 加载装置控制精度提高了 2.1 倍、3.1 倍和 3.1 倍。

4. 结语

理论分析和数值仿真表明, 利用 AMD 装置作为子结构振动台试验的加载设备, 通过力控制算法可以准确模拟试验子结构的动力作用, 具有不需要设置反力墙、对作动器行程要求低、控制精度高、技术先进、容易实施等诸多优点。对比分析可知, 力控制在各个动力响应指标上均具有比位移控制更好的精度, 可以保证振动台子结构试验的试验效果。本文的研究工作可以为振动台子结构试验的加载方案设计和控制算法设计提供参考, 为工程抗震研究提供一种可行的试验研究手段。

致 谢

本文得到“工程抗震与结构诊治北京市重点实验室重点基金项目”和“国家留学基金”的部分资助, 在此表示感谢。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(51578024, 51278013)。

参考文献

- [1] Nakata, N. and Stehman, M. (2012) Substructure Shake Table Test Method Using a Controlled Mass: Formulation and Numerical Simulation. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **41**, 1977-1988.
<https://doi.org/10.1002/eqe.2169>
- [2] Takanashi, K. and Nakashima, M. (1987) Japanese Activities On On-Line Testing. *Journal of Engineering Mechanics*,

- 113, 1014-1032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1987\)113:7\(1014\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1987)113:7(1014))
- [3] 李振宝, 李晓亮, 唐贞云, 等. 基于振动台的动力子结构试验界面反力获取方法[J]. 地震工程与工程振动, 2011(3): 65-70.
- [4] 周大兴, 闫维明, 陈彦江, 等. 考虑土-结构相互作用的振动台实时子结构试验仿真分析[J]. 震灾防技术, 2010(1): 27-31.
- [5] 王倩颖, 吴斌, 欧进萍. 应用 MTS-Schenk 系统的实时子结构实验: 2005 年全国博士生学术论坛(土木建筑学科)[Z]. 中国南京: 20053.
- [6] Shao, X. and Enyart, G. (2014) Development of a Versatile Hybrid Testing System for Seismic Experimentation. *Experimental Techniques*, **38**, 44-60. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2012.00837.x>
- [7] Saouma, V., Haussmann, G., Kang, D., et al. (2014) Real-Time Hybrid Simulation of a Nonductile Reinforced Concrete Frame. *Journal of Structural Engineering*, **140**. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000813](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000813)
- [8] Lindt, J.W.V.D., Bahmani, P., Pryor, S.E., et al. (2015) Overview of the NEES-Soft Experimental Program for Seismic Risk Reduction of Soft-Story Woodframe Buildings. *Structures Congress*, 2875-2885.
- [9] Nakata, N. and Stehman, M. (2014) Substructure Shake Table Testing with Force Controlled Actuators. *Structures Congress*, 1197-1208. <https://doi.org/10.1061/9780784413357.108>
- [10] Nakashima, M., Kato, H. and Takaoka, E. (1992) Development of Real-Time Pseudo Dynamic Testing. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **21**, 79-92. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290210106>
- [11] 周惠蒙, 吴斌, 谭晓晶, 等. 调谐液体阻尼器的振动台子结构试验研究[J]. 土木工程学报, 2014(S1).
- [12] 徐景锋. 考虑 SSI 效应储油罐抗震性能振动台子结构实验研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2013.
- [13] 周惠蒙, 吴斌. TLD 振动台子结构试验的数值仿真分析[J]. 震灾防御技术, 2010(1): 9-19.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-677X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: dsc@hanspub.org