

空间 SRT 混合仿真试验方法的精度和稳定性分析

隋 奕^{1,2}, 马 磊^{1,2}, 张兴虎^{1,2}, 游少建³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055;

3. 美国 MTS 系统公司, 美国明尼苏达州 伊甸园市 55344)

摘要: SRT 混合仿真试验方法是在子结构混合仿真试验基础上进一步发展而来的一种新型抗震试验方法. 介绍了 SRT 混合仿真试验方法的系统组成及原理, 并以一个单层钢结构为原型, 进行了空间 SRT 混合仿真试验. 得到了不同工况下该结构各部位的时程曲线, 通过试验数据的对比对试验精度和稳定性进行了系统的分析. 结果表明作动器动态性能调试技术、实时补偿技术和地震激励的大小对加载的精度及稳定性有较大的影响.

关键词: SRT 混合仿真; 系统组成及原理; OpenSees; 子结构

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2016)04-0489-04

Accuracy and stability analysis of spatial SRT hybrid simulation test method

SUI Yan^{1,2}, MA Lei^{1,2}, ZHANG Xinghu^{1,2}, YOU Shaojie³

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. MTS systems Corporation, 14000 Technology Drive Eden Prairie, MN 55344, USA)

Abstract: The SRT hybrid simulation test method is a new type of seismic test method based on the substructure hybrid simulation experiment's further development. The paper introduces the system composition and the principle of SRT hybrid simulation test method. With a monolayer steel structure as the prototype, the space SRT hybrid simulation experiment was carried out, and the time history curve of the different parts of this structure under different working conditions is obtained. By comparison with experimental data of system, the test precision and stability is analyzed. Results show that the actuator dynamic performance debugging technology, real-time compensation technology, and the size of the earthquake excitation exert greater influence on the precision and stability of the load.

Key words: SRT hybrid simulation; System composition and the principle; OpenSees; substructure;

SRT (soft real-time) 混合仿真试验方法是一种能够更真实模拟试件受地震作用的实时效应及其力学性能与加载速度有关的一种新型抗震试验方法^[1]. 它将有限元数值模拟和实验室构件试验相结合, 能够以较小的成本真实模拟结构在地震荷载下的动力响应, 现已成为国内外研究结构抗震的热点, 也是未来结构抗震试验方法的一种趋势^[2].

1 SRT 混合仿真试验方法的系统组成及原理

SRT 混合仿真试验需要系统的各个组成部分协调工作才能达到较好的精度要求. SRT 混合仿真试验系统由数值模拟计算机、目标计算机、试验计算机、电液伺服控制器和电液伺服作动器组成, 如图

1 所示. 数值模拟计算机装有有限元软件 OpenSees, 主要进行整体结构建模和结构动力反应求解, 数值积分算法包含 OS 法、Newmark 法等. 目标计算机主要用于试验子结构位移的预测和校正, 使得其在指定时刻到达指定位移, 实现实时动力加载. 电液伺服控制器主要承担向油源发出控制加载指令、管理数据采集系统接收反馈数据和向主控制计算机传送数据等工作. 试验计算机是对电液伺服控制器进行控制、管理和数据采集工作. 电液伺服作动器用于执行加载指令^[3].

作动器从接到指令到到达指定位置必然需要一定的时间, 这个时间称为时滞^[4]. 如果作动器在指定时间未到达指定位置, 必然会带来误差. SRT 混合仿真试验方法的特点是若作动器在指定时间

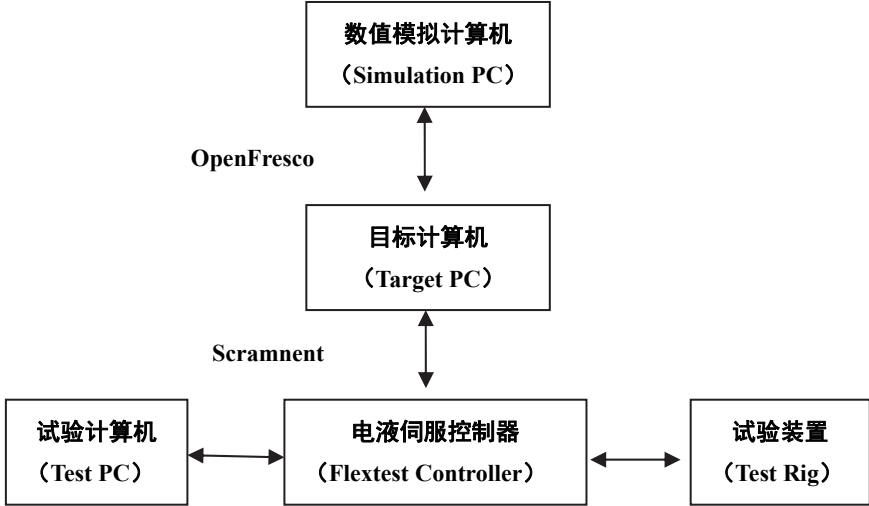


图 1 SRT 混合仿真流程图

Fig.1 Soft real-time simulation flow chart

到达指定位置,系统按实时进行加载;若作动器在指定时间未到达指定位置,系统会延长计算步长时间直至作动器到达指定位置^[5]. 相比 RT (real-time) 混合仿真试验对时限的严格要求, SRT 混合仿真试验在加载时程精度方面有可能降低,但试验基本满足实时加载要求,也不会影响试验的稳定性^[6].

2 SRT 混合仿真试验模型及加载

SRT 混合仿真试验试验模型选用单层单跨空间钢结构框架^[7-8],柱与基础为刚接,梁柱构件选用相同材料的型钢, HW200×200×8×10,横截面积

5 400 mm²,弹性模量和剪切模量为 206 MPa 和 79MPa, I_x 和 I_y 为 4.002E+7 mm⁴、1.334E+7 mm⁴,模型示意图如图 2. 本次试验,时间、位移、加速度、质量的单位分别为 s、mm、gal、和 106 Kg,节点 2、4、6、8 上有集中质量,质量等级为 5 t.

MTS 电液伺服作动器沿 x 、 y 两个方向对试验子结构钢柱柱端进行加载,由于轴压比较小,不施加竖向荷载,如图 3 所示. x 、 y 两个方向输入的地震波选用 EL-Centro (NS,1940) 加速度记录. 试验过程中,各工况阻尼值均为 0.01,加速度峰值有 (55、110、220、400)gal ,试验工况详见表 1.

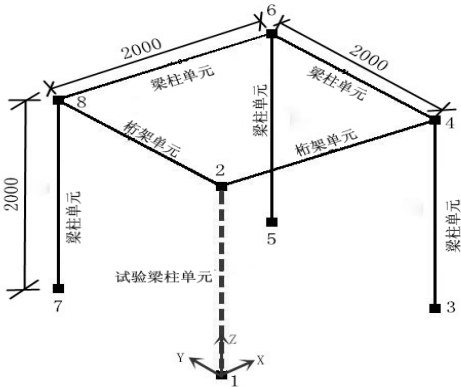


图 2 模型示意图

Fig.2 Model sketch picture

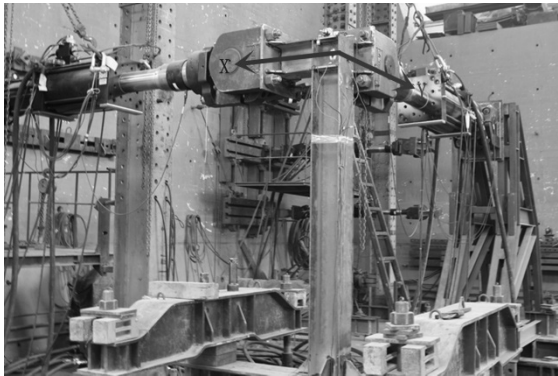


图 3 模型加载图

Fig.3 Test setup

表 1 SRT 混合仿真试验工况

Tab.1 SRT hybrid simulation test conditions

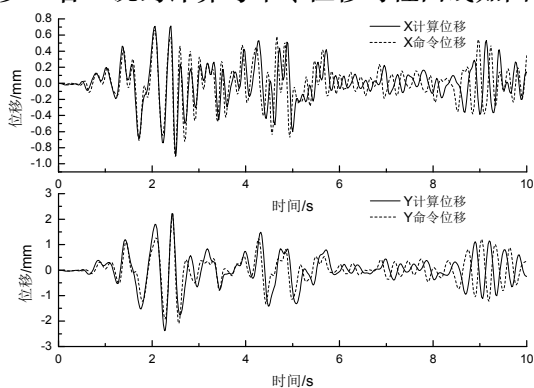
工况	质量/10 ⁶ Kg	X 向加速度峰值/ gal	Y 向加速度峰值/ gal	阻尼值
1	0.005	55	55	0.01
2	0.005	110	110	0.01
3	0.005	220	220	0.01
4	0.005	400	400	0.01

在 OpenSees 中建立整体数值结构模型进行模拟分析^[9-10],并将模拟分析中的柱端位移定义为“计

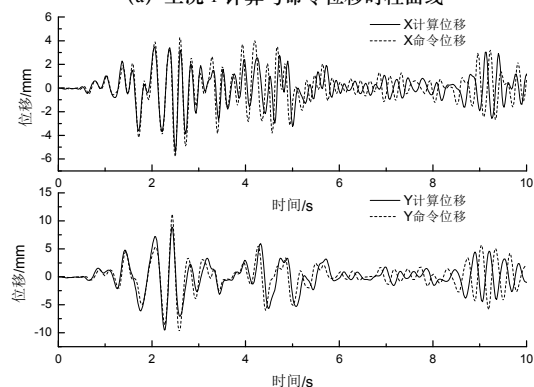
算位移”, SRT 混合仿真试验中柱端目标位移定义为“命令位移”,作动器实际反馈的位移定义为“反

馈位移”。各工况的计算与命令位移时程曲线如图4

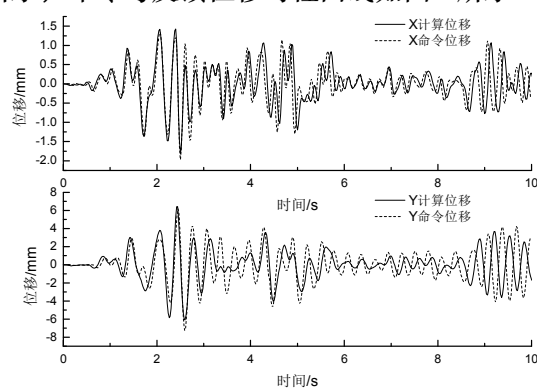
所示,命令与反馈位移时程曲线如图5所示^[11]。



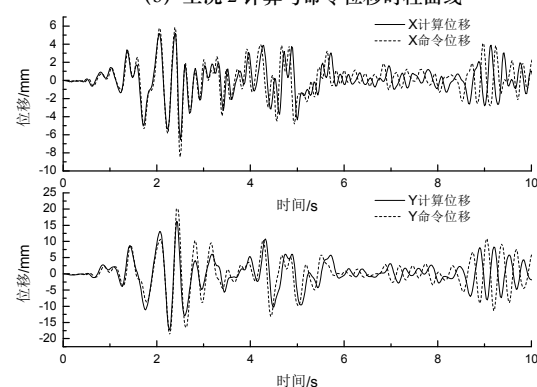
(a) 工况1 计算与命令位移时程曲线



(c) 工况3 计算与命令位移时程曲线



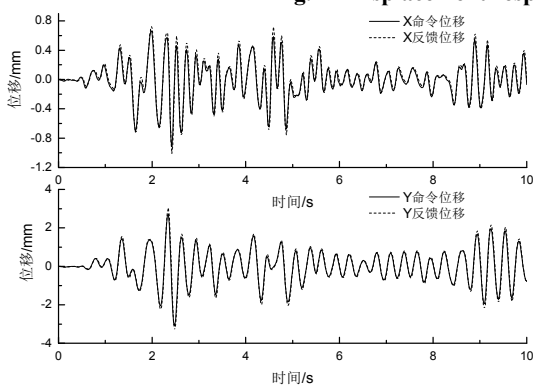
(b) 工况2 计算与命令位移时程曲线



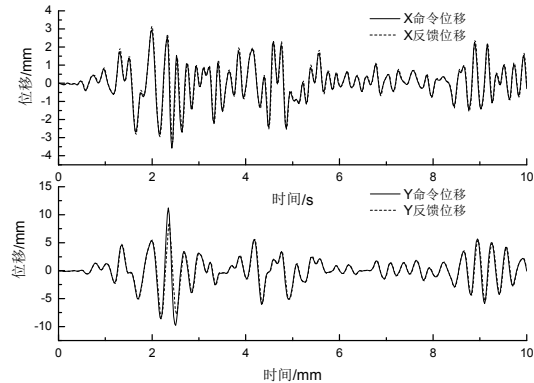
(d) 工况4 计算与命令位移时程曲线

图4 计算与命令位移时程曲线

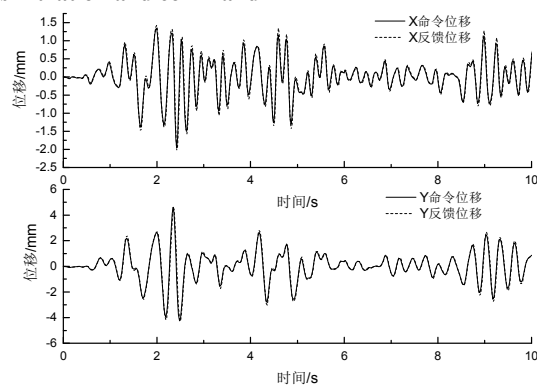
Fig.4 Displacement responses of simulation and command



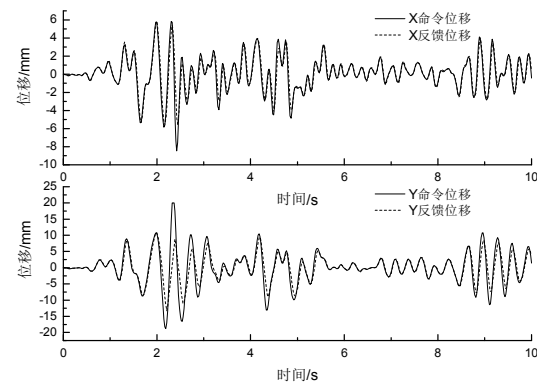
(a) 工况1 命令与反馈位移时程曲线



(c) 工况3 命令与反馈位移时程曲线



(b) 工况2 命令与反馈位移时程曲线



(d) 工况4 命令与反馈位移时程曲线

图5 计算与命令位移时程曲线

Fig.5 Displacement responses of simulation and command

3 结果分析

将“计算位移”、“命令位移”和“反馈位移”

进行比较。

(1) 各工况“计算位移”和“命令位移”的峰

值见表 2, 峰值差趋势图如图 6 所示. 由表 2 和图 6 可见随着地震激励的增大, 峰值差越来越大, 最大在 54%.

分析原因是随着地震激励的增大, 作动器加载速率同时增大, 结构阻尼作用越来越大, 试验中体现出的作用更明显.

表 2 各工况计算位移和命令位移峰值
Tab.2 Peaks of simulation and command displacement at all conditions

工况	计算位移峰值/mm		命令位移峰值/mm	
	X 向	Y 向	X 向	Y 向
1	0.903 41	2.215 15	0.918 21	2.199 19
2	1.425 86	6.436 02	1.339 66	6.191 97
3	5.429 75	9.525 84	5.806 61	9.776 44
4	5.185 57	17.319 3	5.848 05	18.753 8

表 3 各工况命令位移和反馈位移峰值
Tab.3 Peaks of command and feedback displacement at all conditions

工况	命令位移峰值/mm		反馈位移峰值/mm	
	X 向	Y 向	X 向	Y 向
1	0.664 27	3.068 2	0.723 03	3.300 12
2	1.966 91	4.622 75	2.034 73	4.589 73
3	2.953 48	9.776 44	3.144 51	8.335
4	5.848 05	18.753 8	5.892 15	13.329 2

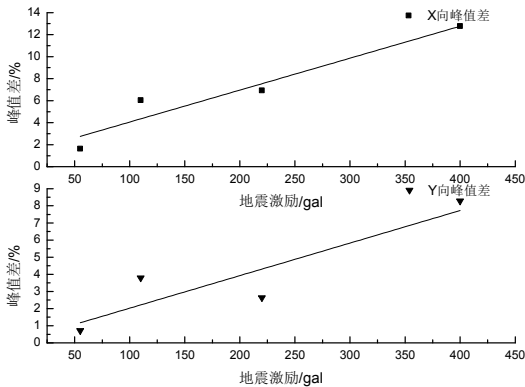


图 6 计算与命令位移的峰值差
Fig.6 The differential peak of simulation and command displacement

4 结论

本文介绍了 SRT 混合仿真试验的系统组成和原理, 通过单层单跨空间钢结构 SRT 混合仿真试验对该试验方法精度和稳定性的影响因素进行了分析, 结论如下:

- (1) 作动器动态性能调试技术和实时补偿技术对加载的精度及稳定性有较大影响;
- (2) 地震激励的大小对试验的精度及稳定性有较大影响.

参考文献 References

[1] 邱法维. 结构抗震实验方法进展[J]. 土木工程学报, 2004(10):19-27
QIU Fawei. Developments of seismic testing methods

(2) 各工况“命令位移”和“反馈位移”的峰值见表 3, 峰值差趋势图如图 7 所示. 从表 3 和图 7 的对比结果可见, 命令峰值和反馈峰值的误差在 0.71% ~ 28.93%之间, 加载的精确度受到作动器动态性能调试技术 PID (比例积分控制器) 和实时补偿技术 Simulink predictor-corrector 的制约.

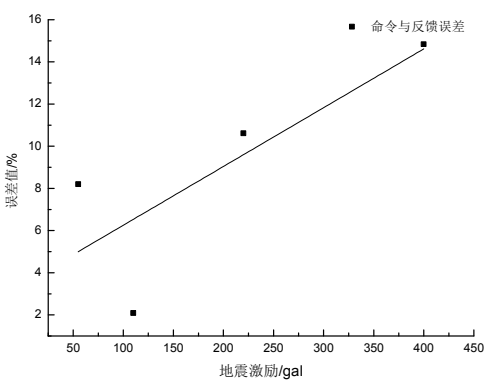


图 7 命令与反馈位移误差值
Fig.7 The error value of command and feedback displacement

for structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2004(10):19-27
[2] 何政, 蒋碧聪. OpenSees 混合模拟试验技术发展与应用[J]. 力学进展, 2012(6):804-820.
HE Zheng, Jiang Bicon. Development and applications in hybrid simulation and experimentation using OpenSees[J]. Advances in Mechanics, 2012(6):804-840.
[3] 张兴虎, 马磊, 隋龔, 等. 空间结构 SRT 混合仿真试验技术研究[J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2014, 46(6) :329-332
ZHANG Xinghu, MA Lei, SUI Yan, et al. Research on the SRT hybrid simulation test technology in spatial structure[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2014, 46(6) :329-332
[4] 徐伟杰, 郭彤, 陈城. 实时混合模拟试验时域指标的比较分析[J]. 结构工程师, 2013(2) :181-188
XU Weijie, GUO Tong, CHEN Cheng. Comparison and