

空间结构 SRT 混合仿真试验技术研究

张兴虎^{1,2}, 马 磊¹, 隋 龔^{1,2}, 强 一^{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: 建立了由 MTS 电液伺服系统、具有预估校正功能的目标计算机、OpenSees 有限元软件、OpenFresco 接口软件等组成的 SRT(Soft Real Time)混合仿真试验系统。基于一个空间钢框架结构, 进行了 SRT 混合仿真试验, 对实验子结构进行了空间 x, y 双向实时加载。试验结果表明该混合仿真试验系统具有良好的精度和稳定性, 能满足空间结构 SRT 混合仿真试验的要求。

关键词: SRT 混合仿真; OpenSees; OpenFresco; 子结构

中图分类号: TU317

文献标识码: A

文章编号: 1006-7930(2014)03-0329-04

现代的结构抗震试验方法可分为四种: 拟静力试验方法^[1-2]、拟动力试验方法^[3]、地震模拟振动台试验方法和混合仿真试验方法^[4-5]。混合仿真试验方法是随着子结构拟动力试验^[6-8]的发展和强大的有限元分析软件平台的开发而兴起的一种新型试验方法, 将有限元软件数值模拟和实验室实际构件试验相结合, 可以最大限度地利用多年积累的理论成果和试验技术, 进行大型复杂结构的地震作用整体分析, 现已成为抗震试验方法研究的焦点, 是未来结构抗震试验方法的发展趋势。混合仿真试验方法为我们研究结构体系的地震反应提供了一种灵活、切实可行和经济的试验手段。

1 SRT 混合仿真试验方法原理及试验系统

1.1 SRT 混合仿真试验方法的原理

混合仿真试验的基本思想是有限元思想, 即“化整为零, 集零为整”。混合仿真试验将整体结构中已经研究成熟的结构部分在一个或多个计算机中用有限元软件进行模拟, 而将其他高度非线性难以数值模拟的结构部分在一个或多个实验室做实际构件试验, 有限元模拟的部分称为数值子结构, 实验室做实际构件试验的部分称为物理子结构, 数值子结构和物理子结构通过网络通信进行数据交换和远程控制, 实现各试验站点和有限元软件平台的协同工作。整体结构的动力反应分析可被看作是在整体结构的有限元模型中嵌入了物理单元或物理模型的传统有限元动力反应分析。

以图 1 所示空间框架结构为例说明混合仿真试验方法的原理, 虚线所示柱为试验子结构, 其余部分为数值子结构, 整体结构的运动方程为式 (1):

$$M\ddot{u}_i + C\dot{u}_i + \bar{K}u_i + \bar{r}_i = P(t_i) \quad (1)$$

式中: M 、 C 分别为整体结构的质量矩阵和阻尼矩阵, 在数值子结构的有限元模型中定义; \bar{K} 为数值子结构的刚度矩阵, 由有限元中数值子结构的本构模型和几何关系确定; \bar{r}_i 为试验子结构在 t_i 时刻的恢复力向量, 由试验子结构在实际构件试验中实际测得; $P(t_i)$ 为 t_i 时刻地震荷载向量, 通过地震波数据记录文件输入; u_i 、 \dot{u}_i 、 \ddot{u}_i 分别为 t_i 时刻整体结构的位移、速度和加速度向量, 通过解整体结构的运动方程得出。

SRT 混合仿真试验的具体过程如下:

(1) 设定试验初始参数, 试验开始时设 $i=0$, $t_i=0$, 结构初始状态 $u_0=0$ 、 $\dot{u}_0=0$ 、 $\ddot{u}_0=0$, 试验子结构的初始刚度矩阵根据材料初始模量估算, 在整体结构的有限元模型建立时输入, 只用于计算结构第一步的动力

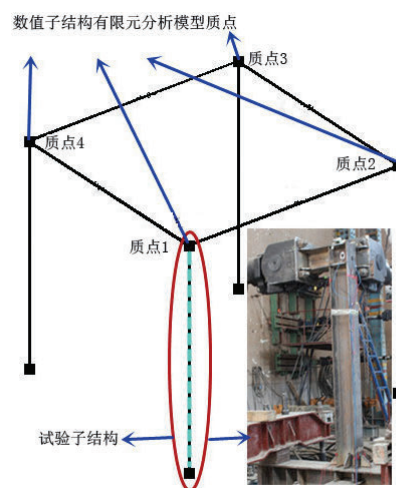


图 1 SRT 混合仿真试验原理

Fig.1 Theory of soft real-time simulation

反应,以后各步的试验子结构恢复力 \bar{r}_i 均由试件实际测得;

(2)利用有限元分析软件采用数值积分方法计算整体结构在地震荷载 $P(t_i)$ 作用下 t_{i+1} 时刻的动力反应 u_{i+1} 、 \dot{u}_{i+1} 、 \ddot{u}_{i+1} ;

(3)利用加载控制程序及电液伺服系统使试验子结构在 t_{i+1} 时刻到达目标位移,测量试验子结构 t_{i+1} 时刻的恢复力向量 \bar{r}_{i+1} ,并将 \bar{r}_{i+1} 回传给有限元模型,用于计算结构下一步动力反应;

(4)有限元分析软件根据整体结构在 t_{i+1} 时刻的状态计算结构在地震荷载 $P(t_{i+1})$ 作用下的 t_{i+2} 时刻的动力反应 u_{i+2} 、 \dot{u}_{i+2} 、 \ddot{u}_{i+2} ;

(5)有限元分析软件计算的同时作动器受试验子结构位移预测程序控制继续对试验子结构进行位移加载,一旦 t_{i+2} 时刻的动力反应 u_{i+2} 、 \dot{u}_{i+2} 、 \ddot{u}_{i+2} 计算得出,作动器将受位移校正程序控制,对试验子结构进行加载,使得试验子结构在 t_{i+2} 时刻到达目标位移,测量试验子结构在 t_{i+2} 时刻的恢复力向量 \bar{r}_{i+2} ,并将 \bar{r}_{i+2} 回传给有限元模型;

(6)令 $i=i+1$,重复第(4)步和第(5)步,直至试验结束.

1.2 SRT 混合仿真试验方法的系统组成

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、电液伺服作动器五部分组成,流程图如图2所示.数值模拟计算机用于进行整体结构的有限元建模及结构的动力反应的求解,预装了有限元分析软件 OpenSees^[9-11]、前后处理程序 OpenSeesNavigator 以及接口软件 OpenFresco^[12],SRT 混合仿真试验要求动力反应的求解花费尽可能短的时间,因此对计算机运算性能有较高要求;目标计算机主要用于试验子结构位移的预测和校正,使得试验子结构能在指定时刻到达指定位移,实现实时动力加载,是试验系统的核心组成部分;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受反馈数据和向主控制计算机传送数据等工作;试验计算机通过 MTS793 软件对电液伺服控制器进行控制、管理以及数据采集工作;电液伺服作动器用于执行试验子结构的加载任务.

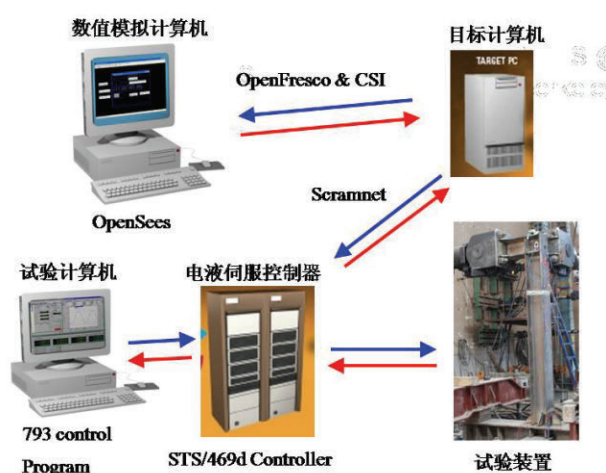


图2 SRT 混合仿真流程图

Fig.2 Soft real-time simulation flow chart

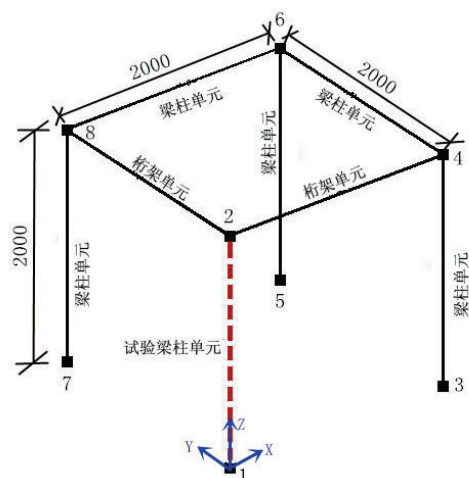


图3 模型示意图

Fig.3 Model sketch picture

2 空间钢结构 SRT 混合仿真试验

2.1 模型设计

为了验证该 SRT 混合仿真试验系统的性能,设计一单层单开间空间钢结构框架模型.该框架高 2 000 mm,两个方向的跨度均为 2 000 mm,梁柱均由 HW200×200×8×10 的型钢构成.柱与基础均为刚接,选取其中一根柱为试验子结构,与其相连的两根梁为二力杆,两端均为铰接,剩余两根梁两端为刚接.模型的简图如图3所示.每个节点的集中质量设为 10 t,由于轴压比较小,故未施加竖向荷载.

数值子结构用 OpenSees 有限元软件进行模拟,单元类型为框架柱和不与试验子结构相连的框架梁选用基于力的梁柱单元,与试验子结构相连的梁选用桁架单元,试验子结构选用梁柱试验单元(BeamColumn experimental element).由于本实验目的是为了检验试验系统的有效性,因此只对框架结构进行弹性阶段的地震反应试验.数值子结构钢材本构选用弹性单轴应力-应变模型(elastic uniaxial material),其材料参数见表1.

表 1 试件参数表
Tab.1 Specimens' parameters

试件类型	横截面类型	横截面面积 A/mm^2	I_x/mm^4	I_y/mm^4	E_s/MPa	G_s/MPa
梁	HW200×200×8×10	5 440	4.002e7	1.334e7	206	79
柱	HW200×200×8×10	5 440	4.002e7	1.334e7	206	79

2.2 模型加载

在试验子结构的柱端分别沿水平 x 向和 y 向各安装一台 MTS 电液伺服作动器, 对钢柱加载, 如图 4 所示. x 、 y 两个方向输入的地震波均为 EL-Centro (NS,1940) 加速度记录 (图 5), 实际输入只取前 10 s 的加速度记录. x 向输入加速度峰值为 220 gal, y 向为 55 gal.



图 4 模型加载图
Fig.4 Test setup

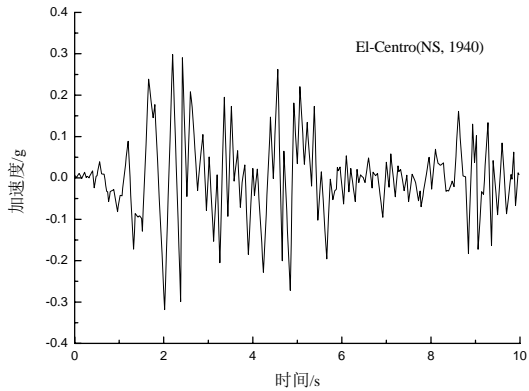


图 5 EL-Centro (NS) 波加速度时程曲线
Fig.5 Acceleration time-history curve of El-Centro(NS) waves

2.3 结果分析

本文将整体结构纯有限元数值模拟的结果作为精确解. 由纯有限元数值模拟得到的试验子结构位移为“计算位移”, SRT 混合仿真试验中目标位移为“试验位移”, 作动器实际反馈的位移为“反馈位移”. 将“计算位移”、“试验位移”、“反馈位移”三者进行对比, 来评价本试验系统的有效性和精度, x 向、 y 向位移对比图分别见图 6、图 7.

对比分析发现“计算位移”和“试验位移”吻合较好, 说明混合仿真试验具有较好的精度; “试验位移”和“反馈位移”吻合很好, 没有时滞现象, 峰值误差在可接受范围内, 说明作动器能使试验子结构在指定的时刻到达目标位移, 实现了 SRT 混合仿真试验的目的.

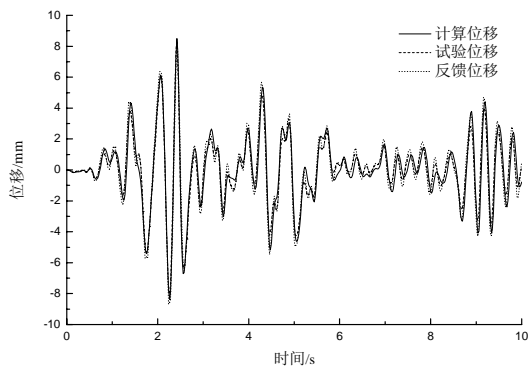


图 6 节点 2 x 向位移时程曲线
Fig.6 Displacement response of node 2 in x direction

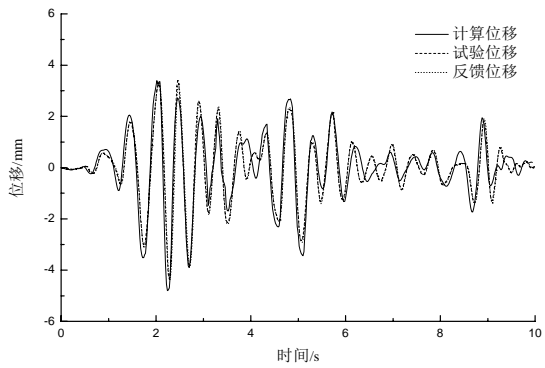


图 7 节点 2 y 向位移时程曲线
Fig.7 Displacement response of node 2 in y direction

3 结论

本文介绍了由 MTS 电液伺服系统、具有预估校正功能的目标计算机、OpenSees 有限元软件、OpenFresco 接口软件等组成的 SRT 混合仿真试验系统, 并通过一个空间钢结构 SRT 混合仿真试验检验了该试验系统, 结论如下:

- (1) 有限元软件 OpenSees、接口软件 OpenFresco、具有预估校正功能的目标机之间具有良好的通讯功

能,能满足 SRT 混合仿真试验的要求;

(2) 单层空间钢框架 SRT 混合仿真试验的试验结果表明: 试验系统具有较好的稳定性和精度。

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 for structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2004(10): 19-27
- [2] 赵刚, 潘鹏, 聂建国, 等. 基于力和位移混合控制的多自由度结构拟静力试验方法研究[J]. 土木工程学报, 2012(12): 54-62.
ZHAO Gang, PAN Peng, NIE Jianguo, et al. Force-displacement mixed control method for quasi-static tests of structures with multiple degrees of freedom[J]. China Civil Engineering Journal, 2012(12): 54-62.
- [3] HAKUNO M, SHIDOWARA M, HARA T. Dynamic destructive test of a cantilever beam, controlled by an analog-computer[J]. Transaction of the Japan Society of Civil Engineering, 1969, 171(12): 1-9.
- [4] 何政, 蒋碧聪. OpenSees 混合模拟试验技术发展与应[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.
- [5] 潘鹏, 王涛, 中岛正爱. 在线混合实验进展: 理论与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.
PAN Peng, WANG Tao, NAKASHIMA Masayoshi. Development of online hybrid test-theory and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [6] 苏宇坤, 潘鹏, 邓开来, 等. 子结构拟动力试验方法在老旧住宅外套式加固改造工程中的应用[J]. 建筑结构学报, 2014(2): 8-14.
SU Yukun, PAN Peng, DENG Kailai, et al. Application of pseudo-dynamic substructure tests to old residential buildings retrofitted by exterior strengthening method[J]. Journal of Building Structures, 2014(2): 8-14.
- [7] Nakashima M, Takai H. Use of substructure techniques in pseudo dynamic testing[J]. BRI Research Paper, 1985, 111(23):350-365.
- [8] DERMITZALDS S N, MAHIN S A. Development of substructuring techniques for online computer controlled seismic performance testing[R]. Report No. UCB/EERC-85/04, University of California, Berkeley, CA, 1985.
- [9] MAZZONI S, MCKENNA F, SCOTT M H, et al. OpenSees user manual[M]. PEER: University of California at Berkeley, 2006.
- [10] MCKENNA F. Object-oriented finite element analysis: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing[D]. Berkeley: University of California, 1997: 10-12.
- [11] SCHELLENBERG A, MAHIN S A, FENVES G L. Application of an experimental software framework for international hybrid simulation[C] //Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Engineering. Taiwan, 2006: 578-596.
- [12] SCHELLENBERG A, KIM H K, TAKAHASHI Y, et al. OpenFresco command language manual[M]. The Regents of the University of California, 2009: 5-34.

Research on the SRT hybrid simulation test technology in spatial structure

ZHANG Xinghu^{1,2}, MA Lei¹, SUI Yan^{1,2}, QIANG Yi^{1,2}, Shawn You³

(1. 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: A SRT (Soft Real Time) hybrid simulation test system was proposed, consisting of the MTS electro-hydraulic servo system, the target computer with predictor-corrector function, OpenSees finite element software, OpenFresco interface software, and etc. The SRT hybrid simulation experiment was carried out, based on a space steel frame structure, while the experimental substructure (test specimen) was under real-time loading along the spatial x, y bidirectional. The experimental results show that the hybrid simulation test system, with good stability and accuracy, could work well to conduct SRT hybrid simulation tests of space structures.

Key words: SRT hybrid simulation; OpenSees; OpenFresco; substructure

(本文编辑 桂智刚)