

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.016

# 子结构拟动力试验平台 NetSLabOSR 开发与试验应用

黄民元<sup>1,2</sup>, 郭玉荣<sup>1</sup>

(1.湖南大学 土木工程学院,长沙 410082;2.中南林业科技大学 土木工程与力学学院,长沙 410004)

**摘要:** 为推进拟动力试验方法的研究与应用,开发了子结构拟动力混合试验平台 NetSLabOSR,可用于结构工程体系抗震性能的评估。NetSLabOSR 试验平台包括 3 个模块:ControlCtrOSR,Tester 和 ControlEqDAQ。通过动态数据链接库开发的 ActiveX 控件方式实现各主模块与试验设备系统的连接,完成子结构拟动力试验试验数据之间的传递、转换。利用 NetSLabOSR 试验平台对子结构取倒 V 型防屈曲耗能支撑和钢管混凝土底柱的试验模型,进行子结构拟动力试验研究,试验结果验证了 NetSLabOSR 试验平台的可靠性和稳定性。

**关键词:** 拟动力试验;子结构;试验平台;抗震性能;可靠性;稳定性

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2016)09-0089-06

## Development and experimental application of substructure pseudo dynamic test platform NetSLabOSR

HUANG Minyuan<sup>1,2</sup>, GUO Yurong<sup>1</sup>

(1.College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2.School of Civil Engineering and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004,China)

**Abstract:** In order to promote research and application of pseudo dynamic test method, a substructure pseudo dynamic test platform NetSLabOSR for building structures is developed to evaluate the seismic performance of structure engineering system. NetSLabOSR test platform includes three modules: ControlCtrOSR, Tester, ControlEqDAQ. The ActiveX control method based on the dynamic data link library is developed to realize the connection between the main module and the test equipment system, and complete transmission and conversion of substructure test data. The substructure pseudo dynamic tests are carried out using the NetSLabOSR test platform, in which the buckling restrained brace with inverted v-shaped and the concrete filled steel tube column are taken as test substructures. Through the research of pseudo dynamic tests, the seismic performance of composite frame structures is studied and the reliability and stability of NetSLabOSR test system platform are verified by substructure pseudo dynamic test results.

**Keywords:** pseudo dynamic test; substructure; test platform; seismic performance; reliability; stability

早在 1969 年日本 M. Hakuno 等提出了拟动力试验方法<sup>[1]</sup>。随着拟动力试验技术的迅速发展,该技术被大量应用在各种大型复杂结构的地震响应研究中,如:高层建筑结构、大跨桥梁结构、大型地下空间等各种领域。目前,有限元化的子结构拟动力试验是当今拟动力试验技术发展的一个重要方向,它

具有建模方便和分析能力强的优势。为了推动拟动力试验的研究与应用,国内外学者开发了多种试验平台。在国外,加州大学伯克利分校 Stephen A. Mahin 等与 MTS 公司合作,建立了混合试验平台 OpenFresco<sup>[2]</sup>。伊利诺斯大学 Spencer B. F.等开发了 UI-SimCor 平台,利用独特的加载边界条件模拟展开了一系列混合试验<sup>[3]</sup>。在国内,邱法维等基于 MTS 的 VC++ 库开发了拟动力实验软件 TUT,进行了考虑扭转效应的子结构拟动力试验研究<sup>[4]</sup>。Wang T 等利用分布式混合试验平台展开了一系列不同试验类型的研究<sup>[5]</sup>。王瑾等通过不同软件的对比分析,发现 OpenSEES 更适合用于分析混合试验的数值子结构<sup>[6]</sup>。王强等使用 OpenFresco 成功实现

收稿日期: 2015-12-27

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(91315301-09);

国家自然科学基金重大国际合作项目(51161120360);

湖南省重点学科建设项目(2013ZDXK001)

作者简介: 黄民元(1976—),男,副教授,博士研究生;

郭玉荣(1970—),男,教授,博士生导师

通信作者: 郭玉荣, yurongguo@hnu.edu.cn

了 OpenSEES 有限元软件与 MTS 之间的数据传递<sup>[7]</sup>. 吴斌等对大型工程结构进行了远程协同混合试验和实时子结构试验数值仿真研究<sup>[8-9]</sup>. 许国山等建立 OpenFresco-LabVIEW-dSpace 的混合试验平台,并对框架结构进行了验证性的试验<sup>[10]</sup>. 蔡新江等建立 MTS-OpenFresco-MATLAB 的试验系统,并进行了相关的验证试验<sup>[11]</sup>. 文献[12-13]基于网络化结构实验室 NetSLab,建立了通用的建筑结构远程协同子结构拟动力试验平台 NetSLabOSR. NetSLabOSR 利用通用有限元程序 OpenSEES 进行被试验结构的有限元建模和地震响应时程分析,因此可以进行 OpenSEES 所能分析的各种类型结构的试验,具有较强的通用性. 采用计算机专业人员开发的网络通讯平台,网络通讯稳定. 目前与试验设备控制程序的连接还只限于邦威机电控制工程有限公司的电液伺服试验系统.

NetSLabOSR 与 OpenFresco、Hytest、TUT 等软件都属于目前常用的混合试验平台,各有优势. NetSLabOSR 是一个能进行多种类型结构拟动力试验的系统,能实现与加载设备的迅速、有效连接,能实时观察整个试验的过程,推进了混合试验的研究与应用.

### 1 NetSLabOSR 试验平台的系统构架

混合试验平台 NetSLabOSR 分 3 大模块:试验总控制中心 ControlCtrOSR,试验站点控制程序 Tester,设备控制程序 ControlEqDAQ. 由 ControlCtrOSR 进行试验子结构的数值模拟,并实现试验指令参数在各个模块之间的传输、反馈. 再经过子结构拟动力试验装备,进行真实子结构的试验加载,并将试验反馈数据发送给上一级的控制中心,子结构拟动力试验的试验系统构架如图 1 所示. 其中,NetSLabOSR 的通讯连接,是通过 NetSLab 通讯和 Com 通讯两种方式来实现的,在 ControlCtrOSR 与 Tester 之间采用 NetSLab 通讯控制连接,在 Tester 和 ControlEqDAQ 之间采用 Com 通讯控制连接<sup>[14]</sup>.

ControlCtrOSR 是试验平台 NetSLabOSR 的核心,负责组织、控制整个试验进程,连接 OpenSEES 进行整体结构有限元分析. 从 OpenSEES 接收加载指令,然后通过 NetSLab 将加载指令发送给异地实验室的 Tester. 同时 ControlCtrOSR 接收 Tester 发来的反馈值,再将其反馈给 OpenSEES,由 OpenSEES 进行下一步有限元计算. 在接收到 OpenSEES 发来的加载指令后,ControlCtrOSR 还需要根据相似比、加载设计和边界条件控制等要求,对加载指令进行转换,在接收到所有 Tester 的反馈后,也需要将反馈

转换后发回给 OpenSEES 进行下一步计算. 在程序监控栏可以实时观察加载指令和反馈的数值变化.

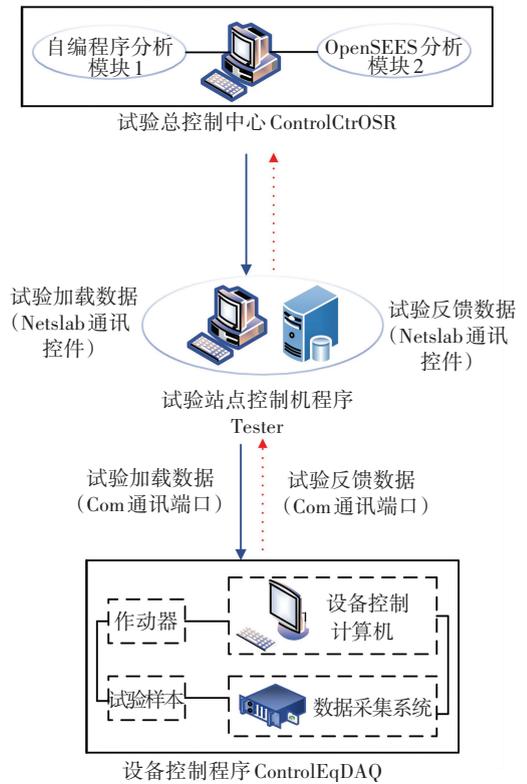


图 1 NetSLabOSR 试验平台的系统构架

Fig.1 System architecture of NetSLabOSR test platform

Tester 程序模块通过 NetSLab 接收 ControlCtrOSR 发来的加载指令,将指令发送给 ControlEqDAQ,然后从后者采集反馈位移和反馈力,根据试验的判断准则结束一个试验步,再将反馈位移和力发回给 ControlCtrOSR. 进行子结构拟动力试验时,需完成各个 Tester 与 ControlCtrOSR 的通讯连接,填写 ControlCtrOSR 程序所在计算机的网络地址 ControlCtr IP 和端口号 ControlCtr Port,以及本程序用于通讯的端口号 Tester Port. 该程序通过串口连接方式与试验作动器控制系统连接,进行真实拟动力试验;Tester 所需执行的任务主要如下:与下一级 ControlEqDAQ 进行连接,接收到来自 ControlCtrOSR 发送的加载指令,即将其他给 ControlEqDAQ 进行加载. 然后 Tester 按一定的时间间隔从通道读取 ControlEqDAQ 实时监测的力和位移值,并判断是否可以结束本试验步,如满足试验步结束准则,Tester 将反馈力和位移发送给 ControlCtrOSR,再等待下一步的试验加载指令.

ControlEqDAQ 系统属于 NetSLabOSR 的第 3 个模块,这里以邦威试验设备控制程序为例介绍其功能,其程序运行界面如图 2 所示. ControlEqDAQ 完成整个真实子结构的试验加载过程,并将试验设备

量测得的试验数据反馈给上一级的 Tester. 同时, ControlEqDAQ 直接与试验加载设备连接在一起,对作动器的控制回路进行合理调整,以提供精确的加载指令控制,避免试验反馈的滞后并保证试验的实时性. ControlEqDAQ 所需执行的任务主要如下:读取来自 Tester 的加载指令,并开始执行这些加载指令. 试验者可根据自己的需要进行多个串口设置 (Port Com  $i$ ), 在子结构拟动力试验过程中每隔一段时间就通过串口读取各个通道的试验加载值,然后将试验量测数据写入各个通道.



图2 邦威试验设备控制程序界面

Fig.2 Interface of test device control program with Bonwe

## 2 子结构拟动力试验验证

### 2.1 试验验证例子 1: 基于 NetSLab 程序自编的试验平台

设计了带屈曲耗能支撑的 10 层三跨的钢管混凝土柱-钢梁结构,利用试验平台进行子结构拟动力试验. 钢管混凝土柱脚与基础、梁柱节点均为刚接,并在组合框架每一层的两边都布置防屈曲耗能支撑,拟动力试验子结构的选取如图 3 所示.

在子结构拟动力试验过程中,液压伺服作动器力、位移的试验量程分别为  $\pm 1\ 000\ \text{kN}$  和  $300\ \text{mm}$ ,在接受到加载指令之后,作动器以  $30\ \text{mm/s}$  的加载速度进行位移加载. 为了及时获得、收集试验信息,每隔  $200\ \text{ms}$  进行子结构拟动力试验的数据读取.

在混合试验中,控制中心和试验机之间的通讯建立、启动试验的过程,自编程序平台的试验程序流程如图 4 所示.

按 9 度设防输入 1940 年 Imperial Valley (El Centro Array 09 台站) 的地震波,在多遇烈度水准 (FOE)、基本设计烈度水准 (DBE)、罕遇烈度水准 (MCE) 3 种不同地震水准工况下,子结构拟动力试验结果见图 5、6 和表 1、2,其中  $u$  为位移,  $V$  为剪力,楼层号用  $n$  表示<sup>[15]</sup>.

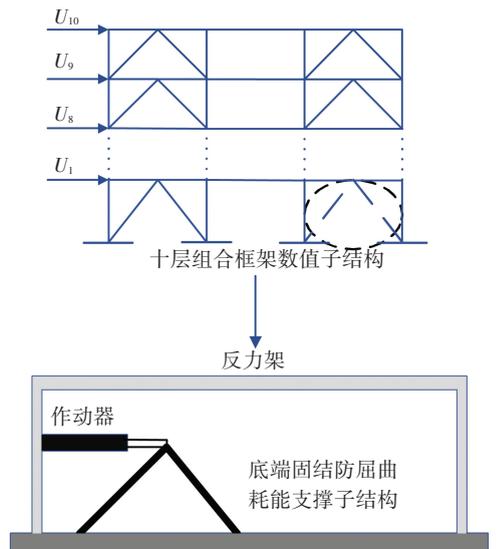


图3 子结构拟动力试验子结构的选取

Fig.3 Substructure selection of substructure pseudo dynamic test

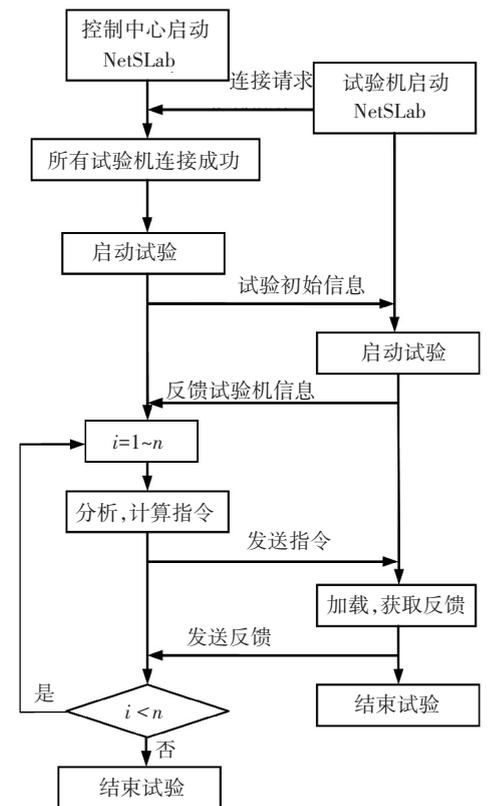


图4 混合试验自编程序平台的试验流程

Fig.4 Test procedure of adopting self compilation software platform with mixing test

在 FOE 工况下,防屈曲耗能支撑钢管混凝土柱-钢梁组合框架的主体框架与支撑均保持在弹性范围,未出现塑性变形. 此时,地震作用较小,组合框架的楼层剪力不大,整体结构没有进入非线性,支撑还没开始展现出减震耗能的特性;在 DBE 工况下,从子结构拟动力试验与数值模拟的支撑剪力比对,见图 5、表 1,可以看出,组合框架结构底层支撑

最大正剪力值的误差为 0.926%,最大负剪力值的误差为-11.885%,其余各层的最大剪力误差绝对值均控制在 10%左右.子结构拟动力试验与数值模拟的支撑剪力包络图形状和走势相同,结果基本吻合.在 MCE 工况下,从子结构拟动力试验与数值模拟的

支撑剪力比对,见图 6、表 2,可以看出,组合框架底层支撑最大正剪力值的误差为 5.1%,最大负剪力值的误差为-4.116%,各层的最大剪力值误差均控制在 6%左右,子结构拟动力试验的试验拟合效果较好.

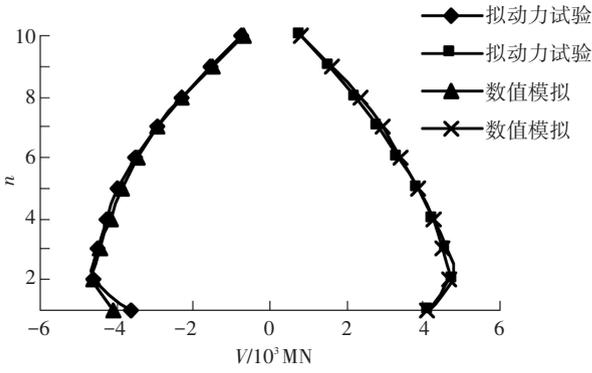


图 5 DBE 工况下子结构拟动力试验与数值模拟的支撑剪力包络图

Fig.5 Brace shear envelope diagram of substructure pseudo dynamic test and numerical simulation under DBE case

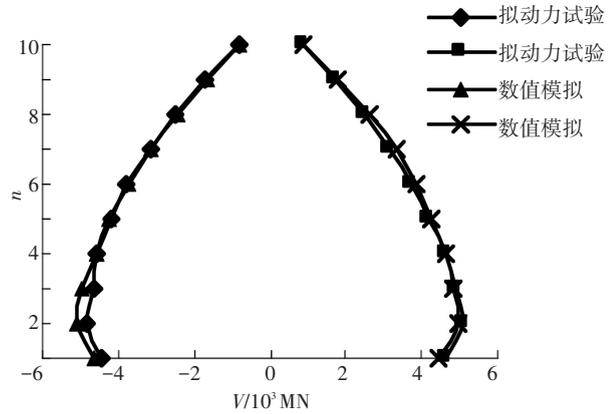


图 6 MCE 工况下子结构拟动力试验与数值模拟的支撑剪力包络图

Fig.6 Brace shear envelope diagram of substructure pseudo dynamic test and numerical simulation under MCE case

表 1 DBE 工况下子结构拟动力试验与数值模拟最大支撑剪力值的误差对比

Tab.1 Error comparison of maximum brace shear of substructure pseudo dynamic test and numerical simulation under DBE case

n	V <sub>max</sub> /kN		V <sub>min</sub> /kN		误差/%	
	模拟值	试验值	模拟值	试验值	V <sub>max</sub>	V <sub>min</sub>
1	4 114.873	4 152.960	-4 099.038	-3 611.880	0.926	-11.885
2	4 647.718	4 793.180	-4 638.384	-4 591.352	3.130	-1.014
3	4 510.504	4 600.924	-4 464.359	-4 498.768	2.005	0.771
4	4 270.834	4 275.760	-4 143.883	-4 294.654	0.115	3.638
5	3 885.374	3 849.977	-3 851.880	-3 960.203	-0.911	2.812
6	3 406.069	3 369.417	-3 484.068	-3 514.924	-1.076	0.886
7	2 971.013	2 819.427	-2 964.472	-2 963.651	-5.102	-0.028
8	2 382.848	2 228.474	-2 299.185	-2 303.602	-6.479	0.192
9	1 627.644	1 552.897	-1 524.132	-1 564.764	-4.592	2.666
10	796.026	794.201	-716.640	-778.394	-0.229	8.617

表 2 MCE 工况下子结构拟动力试验与数值模拟最大支撑剪力值的误差对比

Tab.2 Error comparison of maximum brace shear of substructure pseudo dynamic test and numerical simulation under MCE case

n	V <sub>max</sub> /kN		V <sub>min</sub> /kN		误差/%	
	模拟值	试验值	模拟值	试验值	V <sub>max</sub>	V <sub>min</sub>
1	4 426.882	4 652.640	-4 657.117	-4 465.440	5.100	-4.116
2	4 946.265	5 115.542	-5 077.027	-4 822.938	3.422	-5.005
3	4 864.748	4 909.573	-4 932.351	-4 669.846	0.921	-5.322
4	4 626.065	4 610.934	-4 590.083	-4 551.675	-0.327	-0.837
5	4 275.160	4 181.672	-4 231.272	-4 202.767	-2.187	-0.674
6	3 861.576	3 700.117	-3 732.847	-3 771.932	-4.181	1.047
7	3 316.059	3 141.522	-3 115.150	-3 168.879	-5.263	1.725
8	2 611.860	2 493.473	-2 428.541	-2 503.314	-4.533	3.079
9	1 759.808	1 711.839	-1 626.610	-1 687.514	-2.726	3.744
10	869.157	859.556	-782.975	-831.636	-1.105	6.215

### 2.2 试验验证例子 2: 基于 OpenSEES 软件的试验平台

以 OpenSEES 为核心有限元计算程序的 NetSLabOSR 的试验程序流程如图 7 所示。

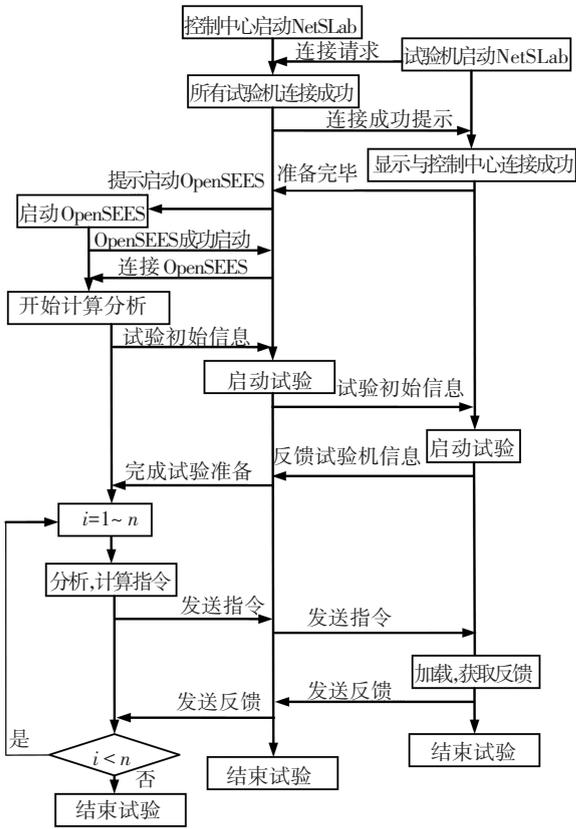
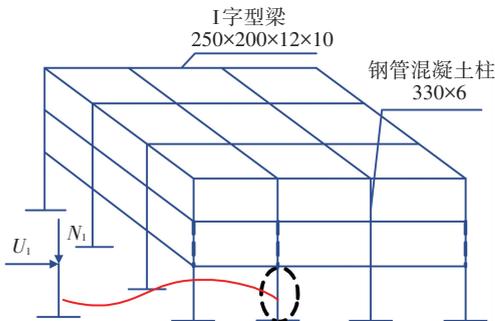


图 7 采用 OpenSEES 软件平台的试验流程

Fig.7 Test procedure of adopting OpenSEES software platform

将试验平台应用于一个空间的 3 层三跨钢管混凝土柱-钢梁组合框架的子结构拟动力试验. 空间组合框架试验子结构的选取如图 8 所示<sup>[16]</sup>.



柱试验子结构

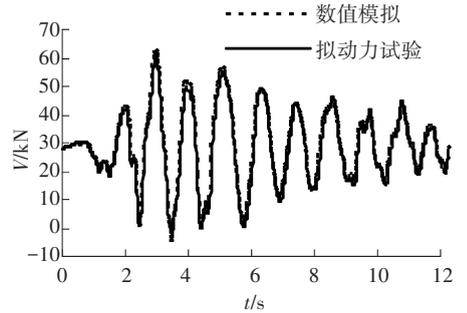
图 8 空间组合框架试验子结构的选取 (mm)

Fig.8 Test substructure selection of spatial composite frame(mm)

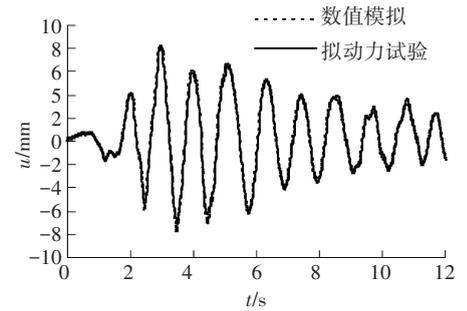
子结构拟动力试验的试验结果如图 9、10 所示. NetSLabOSR 试验平台的操作稳定、有效,且数据流通性好,能真实反映出组合框架在地震作用下的力学性能与响应特征.

从图 9、10 可以看出,试验组合框架底层柱子结

构拟动力试验和数值整体分析的结果拟合比较好,子结构拟动力试验底层柱顶剪力的最大值为 61.747 kN,数值模拟底层柱顶剪力的最大值为 62.767 kN,两者比对的误差为 -1.652%. 子结构拟动力试验底层柱顶位移的最大值为 8.289 mm,数值模拟底层柱顶位移的最大值为 8.120 mm,两者比对的误差为 2.039%.



(a) 柱剪力时程



(b) 柱顶位移时程

图 9 底层柱剪力时程和柱顶位移时程对比曲线

Fig.9 Comparison curve of shear time history of first storey column and drift time history with column top

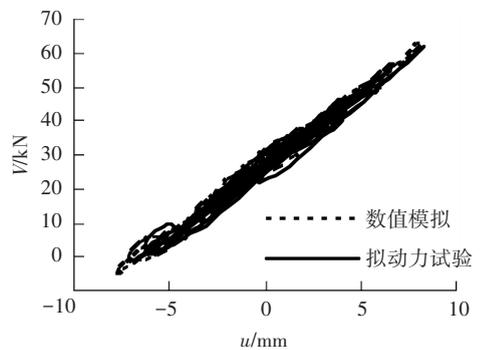


图 10 底层柱的剪力-位移对比曲线

Fig.10 Shear drift comparison curve of first storey column

## 3 结论

1) 结合分布式拟动力试验的要求,构建了基于服务器-客户端概念的 NetSLabOSR 试验平台. 试验程序模块 ControlCtrOSR、Tester 和 ControlEqDAQ 之间,通过 NetSLab 通讯和 Com 通讯机制的连接方式,来实现子结构拟动力试验试验数据之间的快速传递、反馈,完成对组合框架结构的地震响应模拟.

2)采用基于 NetSLab 程序自编的 NetSLabOSR 试验平台,对 10 层三跨带防屈曲支撑的方钢管混凝土柱—H 形钢梁平面框架进行了地震响应的试验模拟. 在拟动力真实试验中,子结构拟动力试验与数值模拟支撑剪力的包络图形状、走势基本相同,防屈曲耗能支撑承担了组合框架的大部分剪力,展现出较好的耗能减震效果,NetSLabOSR 试验平台在子结构试验全过程中也体现出良好的通信效率.

3)采用基于 OpenSEES 软件的 NetSLabOSR 试验平台,对 3 层三跨钢管混凝土柱—钢梁空间框架进行子结构拟动力试验. NetSLabOSR 各试验模块之间的通信连接界限兼容,试验过程稳定、安全,未出现试验程序的故障和中断的情况. NetSLabOSR 与 OpenSEES 软件之间的指令提取和反馈设计合理,能实现复杂结构的子结构拟动力试验,大大降低了试验平台开发的编程工作量,也验证了 NetSLabOSR 的有效性与稳定性.

### 参考文献

[1] TAKAHASHI K, UDAGAWA K, SEKI M, et al. Nonlinear earthquake response analysis of structures by a computer actuator on-line system (part 1 detail of the system) [J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1975(229): 77-83, 190.

[2] STOJADINOVIC B, MOSQUEDA G, MAHIN S A. Event-driven control system for geographically distributed hybrid simulation [J]. ASCE, Journal of Structural Engineering, 2006, 132(1): 68 - 77.

[3] PHILLIPS B M, SPENCER B F. Model-based multiactuator control for real-time hybrid simulation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139( 2 ): 219 - 228.

[4] 邱法维, 潘鹏, 钱稼茹, 等. 建筑结构拟动力实验软件的开发与应用 [J]. 建筑结构学报, 2000, 21(5): 22 - 32.

QIU Fawei, PAN Peng, QIAN Jiaru, et al. Development and application of pseudo dynamic testing software [J]. Journal of Building Structures, 2000, 21(5): 22 - 32.

[5] WANG T, NAKASHIMA M, PAN P. On-line hybrid test combining with general-purpose finite element software [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2006, 35(2): 1471- 1488.

[6] 王瑾, 蔡新江, 田石柱. 基于 OpenSEES 的 CFRP 加固 RC 短柱抗震性能数值模拟 [J]. 世界地震工程, 2009, 25(4): 108-111.

WANG Jin, CAI Xinjiang, TIAN Shizhu. Numerical simulation on seismic behavior of CFRP retrofitted RC short column based on OpenSees [J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4): 108-111.

[7] 王强, 冯帆, SHAWN Y, 等. 基于有限元软件的子结构拟动力试验技术 [J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(6):

1085-1089.

WANG Qiang, FENG Fan, SHAWN Y, et al. Pseudo-dynamic test method with sub-structure technique based on finite element software OpenSees [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2010, 26(6): 1085-1089.

[8] 吴斌, 尹全林, 张涛. 实时子结构试验中加载系统数值模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, 42(12): 1855-1859.

WU Bin, YIN Quanlin, ZHANG Tao. Numerical model of loading system for real-time substructure testing [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2010, 42(12): 1855-1859.

[9] WU B, ZHOU H. Sliding mode for equivalent force control in real-time substructure testing [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2014, 21(10): 1284 - 1303.

[10] 许国山, 郝伟, 陈永盛, 等. 基于 OpenFresco-LabVIEW-dSpace 的混合试验系统研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(3): 417-423.

XU Guoshan, HAO Wei, CHEN Yongsheng, et al. Experimental validation on hybrid testing system based on OpenFresco-LabVIEW-dSpace [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 417-423.

[11] 蔡新江, 田石柱. MTS-OpenFresco-MATLAB 混合试验系统构建及验证试验 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 117-122.

CAI Xinjiang, TIAN Shizhu. MTS-OpenFresco-MATLAB hybrid simulation system construction and verification test [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 117-122.

[12] 郭玉荣, 范云蕾, 曾东, 等. 网络化结构实验室: 桥梁结构远程拟动力试验平台开发与应用 [J]. 工程力学, 2010, A01: 94-98.

GUO Yurong, FAN Yunlei, ZENG Dong, et al. Networked structural laboratories: development and application of remote pseudo-dynamic testing platforms for bridge structures [J]. Engineering Mechanics, 2010, A01: 94-98.

[13] 肖岩, 郭玉荣, 范云蕾, 等. 结构远程协同试验原理、方法和应用 [M]. 长沙: 科学出版社, 2012: 75-85.

XIAO Yan, GUO Yurong, FAN Yunlei, et al. Networked structural laboratories (NetSLab) principles, methods and applications [M]. Changsha: Science Press, 2012: 75-85.

[14] 郭玉荣. 多层建筑结构远程协同拟动力试验软件 NetSLab\_MSB: 2014SR159708 [P]. 2013-12-28.

GUO Yurong. Networked laboratories software NetSLab\_MSB of Multi-story building structure: 2014SR159708 [P]. 2013-12-28.

[15] 王枝茂. 带斜撑钢管混凝土柱—钢梁组合框架抗震性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011: 23-66.

WANG Zhimao. Seismic behavior of concrete filled tubular column-steel beam composite frames with braces [D]. Changsha: Hunan University, 2011: 23-66.

[16] 刘钟真. 建筑结构子结构拟动力试验方法研究及应用 [D]. 长沙: 湖南大学, 2015, 52-67.

LIU Zhongzhen. Research and application on substructure pseudo dynamic test method of building structures [D]. Changsha: Hunan University, 2015, 52-67.

(编辑 魏希柱)