

基于多尺度模型的抗震混合试验方法研究

李双江 田石柱

(苏州科技大学, 江苏苏州 215011)

摘要: 为了从不同视角下分析结构的抗震性能, 将多尺度的思想应用到结构的抗震分析中, 形成集宏观计算单元、微观计算单元和试验单元为一体的多尺度抗震混合试验方法。以三层四跨 Benchmark 模型为研究对象, AOM (ABAQUS、OpenFresco、MTS) 混合试验系统为平台, 建立多尺度混合试验模型进行抗震试验分析。试验结果表明 AOM 混合试验系统具有较强的稳定性和较高的试验控制精度。并从试验结果中对结构进行宏观、微观层面进行分析, 对结构的抗震性能分析提供了一种方法。

关键词: 抗震混合试验; 多尺度; 宏观计算单元; 微观计算单元; 试验单元

中图分类号: TU317 P315.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)02-0041-7

Research on seismic hybrid simulation based on multi-scale model

Li Shuangjiang Tian Shizhu

(Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: In order to analyze the seismic performance of the structure from different perspectives, the multi-scale idea is applied to the seismic analysis of the structure, leading to a multi-scale seismic hybrid test method of integrating the macro computing element, the microscopic computing element and the experimental element. Based on the AOM (ABAQUS, OpenFresco, MTS) hybrid test system, the three-layer and four-span benchmark model is established as a multi-scale model for the seismic test analysis. The test results show that the AOM hybrid test system has strong stability and high accuracy of test control. Based on the test results, the structure is analyzed at the macro and micro levels, and a method for the seismic performance analysis of the structure is provided.

Keywords: seismic hybrid simulation; multi-scale; macro computing element; microscopic computing element; experimental element

E-mail: lishuangjiang@mail.usts.edu.cn

引 言

抗震混合试验为研究工程结构在地震作用下的响应提供了一种新的研究手段, 近年来, 在国内外得到了较快的发展和运用。抗震混合试验技术的发展主要集中体现在混合试验平台的开发, 试验子结构的边界条件模拟等方面。

对于混合试验平台的建设方面, 加州大学伯克利分校 Andreas Schellenberg 等人(2006)采用 tcl 语言开发了开放式的混合试验系统平台 OpenFresco, 该平台能够以 OpenSees、ABAQUS、MATLAB、LS-Dyna

和 Zeus-NL 等有限元分析软件作为计算引擎, 并提供一系列的标准接口, 实现有限元计算软件与试验控制系统之间的数据交互^[1]。伊利诺斯大学 Kwon 等人(2005)开发了 UI-SIMCOR 试验框架软件。该框架通过一系列的软件整合和架构处理, 使其独立于不同的积分算法, 并且通过互联网传输连接, 协调不同的模型, 能够实现多点、多代码软件连接^[2-3]。Nakashima、潘鹏、王涛等人(2005-2010)开发了三种不同的混合试验系统: 主机-分站(host-station)混合试验系统, 分离模型(separated-model)混合试验系统, 站点对站点(Peer-to-Peer)混合试验系统^[4-6]。肖岩(2006)提出了 e-test 的构想, 即利用网络开展混合试验研究, 开发了网络化结构实验室 NetSLab 平台, 开发了多层剪切型结构的远程协同试验模块 MDOF-module^[7-8]。吴斌等人(2015)利用 MTS 二次开发编程库 VB-COM 连接试验设备控制系统, 开发了建筑结

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51778394)

作者简介: 李双江, 硕士, 实验师

收稿日期: 2019-03-29

构混合试验平台 HyTest。该平台采用 MTS 二次开发编程库连接试验控制系统,有限元软件 OpenSees 和 ABAQUS 可以接入系统进行数值子结构的分析^[9]。

在边界条件模拟方面,美国伊利诺斯大学香槟分校(2007)基于现有作动器加载技术开发了边界条件加载模拟装置(LBCB),此装置能够实现三向六自由度加载,适合框架及桥梁柱的加载试验^[10]。Hashemi 等人(2015),利用8个高性能作动器和6自由度控制系统开发了多轴子结构加载系统(MAST),实现了对柱构件的多自由度控制或受力边界加载模拟^[11]。吴斌,曾聪等人(2014)开发了通过多自由度耦合的三自由度结构动力试验加载系统^[12]。Mosqueda 等在重叠域方法(Overlapping method)基础上,进行了改进并提出了应对结构大变形的新型子结构混合试验方法,该方法利用数值子结构与试验子结构的重叠域部分简化了边界条件,从而便于作动器的安装布置,并能够降低试验成本^[13]。

对于多尺度有限元的应用,Hussam N 等人(2013)利用 UI-SimCor 构建混合试验系统对2层4跨的半刚性局部加强钢框架结构进行了多尺度混合试验^[14]。J. A Murray 等(2015)利用 UI-SimCor 及 LBCB 加载系统对东西6跨,南北2跨,2层钢筋混凝土框架结构进行抗震混合试验分析^[15]。Y Chae 等(2017年,)为了研究加载速率对钢筋混凝土结构的影响,利用 MATLAB/Simulink 及加载设备对一座两跨连续桥梁进行慢速实时抗震混合试验分析^[16]。

为了从宏观和微观层面对工程结构进行地震响应分析,把控结构在地震作用下宏观及微观层面的反应。本文采用3层4跨钢框架 benchmark 模型建立集宏观、微观有限元以及试验单元为一体的多尺度混合模型,并利用苏州科技大学现有的 ABAQUS-OpenFresco-MTS (AOM)混合试验系统,进行抗震混合试验研究,以探索一种新的抗震分析方法。

1 多尺度模型抗震混合试验原理

1.1 基本原理

目前对工程结构的抗震性能研究主要有两种方法,有限元数值模拟和结构抗震试验,抗震混合试验方法集数值分析和试验为一体,对结构进行整体到局部的全面分析。将多尺度的方法应用到抗震混合试验中,把结构划分为宏观计算单元、微观计算单元和试验单元,则其动力平衡方程可表示为式(1)。

$$\begin{bmatrix} M_{hh} \\ M_{ww} \\ M_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_h \\ \ddot{u}_w \\ \ddot{u}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{hh} & C_{hw} & C_{he} \\ C_{wh} & C_{ww} & C_{we} \\ C_{eh} & C_{ew} & C_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_h \\ \dot{u}_w \\ \dot{u}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{hh} & K_{hw} & K_{he} \\ K_{wh} & K_{ww} & K_{we} \\ K_{eh} & K_{ew} & K_{ee} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_h \\ u_w \\ u_e \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} M_{hh} \\ M_{ww} \\ M_{ee} \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (1)$$

式中: M_{hh} 、 C_{hh} 、 K_{hh} 分别为与宏观单元相关的质量、阻尼和刚度系数; M_{ww} 、 C_{ww} 、 K_{ww} 分别为与微观单元相关的质量、阻尼和刚度系数; M_{ee} 、 C_{ee} 、 K_{ee} 分别为与微观单元相关的质量、阻尼和刚度系数; \ddot{u}_g 为地震震动加速度。

在抗震混合试验过程中,通过边界运动协调方程实现试验单元与有限元之间的连接。在整体分析过程中利用计算机计算出试验单元所需的加载条件,并通过试验控制系统对试验单元进行物理试验,最后将试验实测得出的试验单元恢复力带入结构整体动力方程,进行下一步计算。则多尺度混合试验模型动力方程可表示为:

$$\begin{bmatrix} M_h \\ M_w \\ M_e \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_h \\ \ddot{u}_w \\ \ddot{u}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{hh} & C_{hw} & 0 \\ C_{wh} & C_{ww} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_h \\ \dot{u}_w \\ \dot{u}_e \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{hh} & K_{hw} & K_{he} \\ K_{wh} & K_{ww} & K_{we} \\ K_{eh} & K_{ew} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_h \\ u_w \\ u_e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_e \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} M_h \\ M_w \\ M_e \end{Bmatrix} \ddot{u}_g \quad (2)$$

式中: f_e 为试验过程中所实测的反力。

1.2 多尺度混合模型中不同单元之间的耦合

在多尺度混合模型中要实现不同单元之间的界面连接,主要是使不同单元节点在连接界面上保持运动协调。其界面连接形式如图1所示。根据平截面假定,运动协调方程可表示为式(3)。

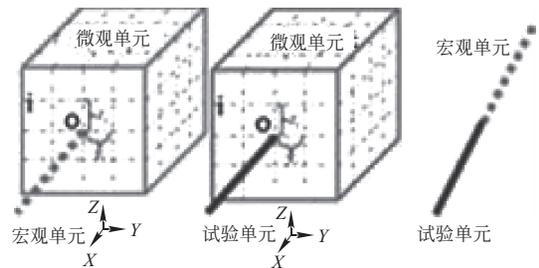


图1 试验单元与计算单元界面连接

Fig. 1 Boundary of experimental element and computing element

$$\begin{cases} u_i \\ v_i \\ w_i \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & z_i \sin & y_i \sin \\ 0 & 1 & 0 & y_i \cos + z_i \sin & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -y_i \sin + z_i \cos & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式中： $[u, v, w, \theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ 为宏观单元在连接界面上的位移； $[u_i, v_i, w_i]^T$ 为微观单元连接界面上 i 节点的位移； y_i, z_i 分别表示以连接界面上相应的坐标。假设 $U=[u_i, v_i, w_i]^T$ 则连接界面上的动力方程可表示为：

$$[M^B] \{\ddot{U}^B\} + [C^B] \{\dot{U}^B\} + [K^B] \{U\} = \{F^B\} \quad (4)$$

式中：上标 B 表示不同单元之间的连接界面； $\{F^B\}$ 为连接界面上传递的力。

1.3 试验单元边界条件模拟

在混合试验中，需要对试验单元自由度进行缩减以满足试验加载条件，如图 2 所示，试验单元的边界自由度通过坐标转换由原来直角坐标系下的 6 自由度缩减到悬臂自由度下的 3 自由度。图中 u 表示节点自由度， f 表示与相应自由度相关的力。上标 E 表示可用试验设备进行模拟的自由度。

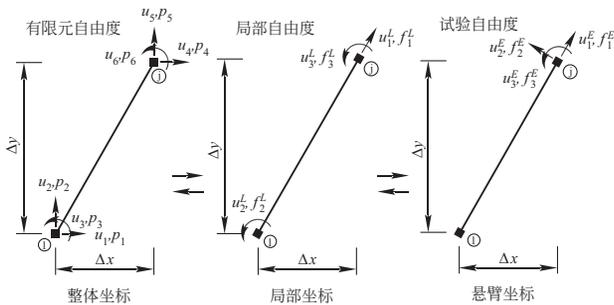


图 2 试验单元自由度缩减

Fig. 2 Reduction of degrees of freedom for physical element

在实验室中，利用多个作动器之间的协调运动可对试验单元多自由度下的边界条件进行模拟，如图 3 所示。利用水平方向两个作动器间的协调运动来模拟试验单元的水平自由度和转动自由度，利用一个作动器模拟试验单元的竖向自由度。

混合试验中作动器位移命令由计算模型所得。相应的计算单元中的边界条件由试验所得。

$$\begin{cases} d_1 = u_1 \\ d_2 = \sqrt{(u_1 - L \sin(u_3) + D)^2 + (L \cos(u_3) - L)^2} - D \\ d_3 = u_2 \end{cases} \quad (5)$$

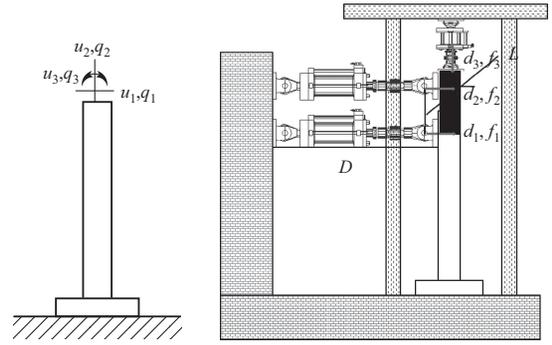


图 3 试验单元加载方案

Fig. 3 Loading scheme of the experimental element

$$\begin{cases} u_1 = d_1 \\ u_3 = \arctan\left(\frac{D+d_1}{L}\right) - \arccos\left(\frac{(D+d_2)^2 - 2L^2 - (D+d_1)^2}{-2L\sqrt{L^2 + (D+d_1)^2}}\right) \\ u_2 = d_3 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} q_1 = f_1 + f_2 \cos(\theta) \\ q_3 = -f_2 \cos(\theta) L \cos(u_3) - f_2 \sin(\theta) L \sin(u_3) - \frac{f_3}{d_1 - d_2} \\ q_2 = f_3 \\ \theta = \arcsin\left(\frac{L(1 - \cos(u_3))}{D + d_2}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中： d 为作动器目标位移； L 为刚壁的长度； D 为水平作动器的初始长度。

2 混合试验系统

混合试验系统由 ABAQUS、OpenFresco、MTS 试验控制系统构成。通过用户子程序实现 ABAQUS 与 OpenFresco 之间的通信，利用 MTS CSIC 通讯协议实现 OpenFresco 与 MTS 试验控制系统之间的通信，其原理如图 4 所示，混合试验原理如图 5 所示。

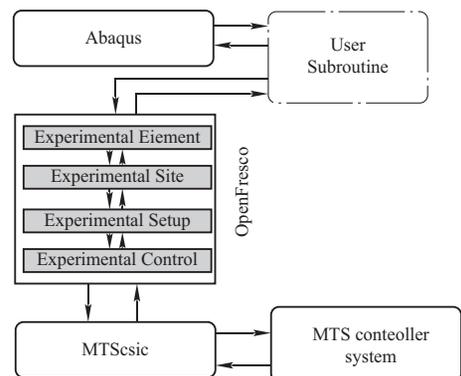


图 4 基于 ABAQUS 的混合试验系统

Fig. 4 Hybrid simulation system based on ABAQUS

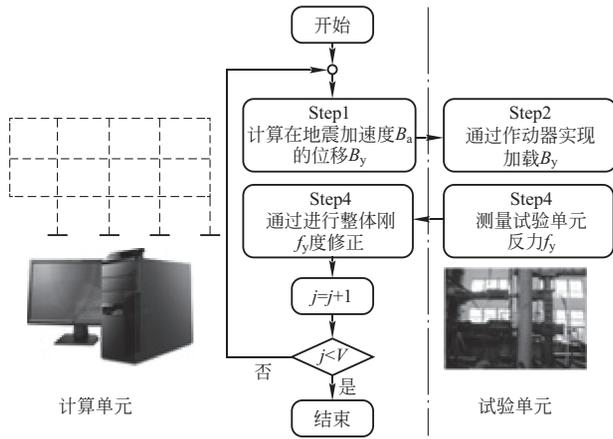


图5 混合试验流程

Fig. 5 Procedure of hybrid simulation

3 基于3层4跨 Benchmark 模型的多尺度混合试验分析

本试验在江苏省结构工程重点实验室进行, 针对第三代三层基准建筑物 Benchmark 钢框架模型进行多尺度抗震混合试验。模型中右边跨 1~3 层框架柱和框架梁连接方式为铰接, 其余为刚接。跨距 9.15m, 层高 3.96m, 与基础的连接方式为固结。1~2 层建筑质量为 9.57×10^5 kg, 3 层质量为 2.04×10^6 kg, 框架材料属性见图 6 及表 1。

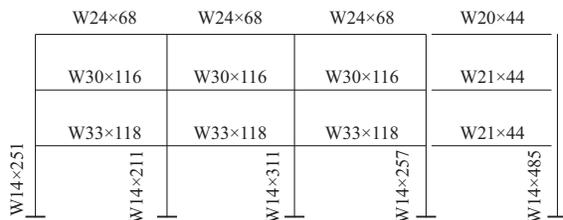


图6 框架模型及材料布置图

Fig. 6 Frame model and material layout

表1 钢材截面尺寸及材料力学性

Table 1 Cross-sectional size of steel and mechanical properties of material

钢材型号	截面高度 (mm)	翼缘宽度 (mm)	翼缘厚度 (mm)	腹板厚度 (mm)	材料性能 (MPa)
W14x257	416	406	48	30	
W14x311	435	412	57	36	345
W14x68	357	255	18	10	
W33x118	835	292	19	14	
W30x116	762	266	22	14	
W24x68	603	228	15	10	248
W21x44	525	165	11	9	

将框架划分为试验单元、微观计算单元及宏观计算单元, 如图 7 所示。选取框架底层左侧边柱为试验单元, 其中框架节点为微观计算单元采用 ABAQUS 中的 C3D8R 单元模拟, 框架左侧底柱为试验单元, 其余部分为宏观计算单元采用 B31 单元模拟。

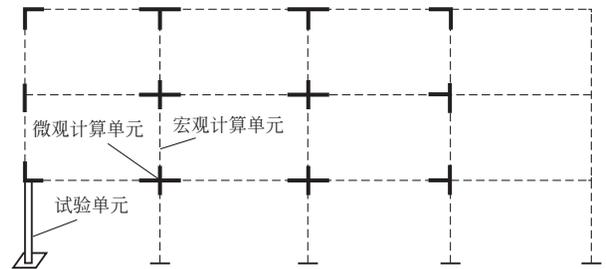


图7 多尺度混合模型

Fig. 7 Multi-scale hybrid simulation model

有试验条件限制, 试验单元不能采用 1:1 模型, 根据刚度等效原则, 选用 HM 300x200 型钢, 相对应模型长度 $l' = 1.3$ m。为便于加载, 试件设计为 1.5m, 其中作动器加载位置为距离柱底 1.3m 处, 横截面尺寸为 $H \times B \times T \times T_w \times r = 294\text{mm} \times 200\text{mm} \times 12\text{mm} \times 8\text{mm} \times 20\text{mm}$ (见图 8), I' 强轴 $= 0.114 \times 10^9 \text{mm}^4$ 。

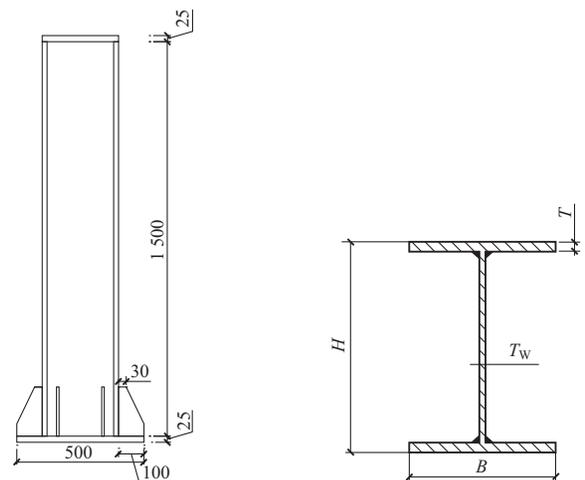


图8 试件模型(单位: mm)

Fig. 8 Specimen model(unit: mm)

3.1 试验单元加载及测点布置

该试验于江苏省结构工程重点实验室进行, 混合试验系统构成及加载测试如图 9、图 10 所示。

3.2 抗震混合试验及结果分析

选用 El-Centro 前 10s (如图 11 所示), 阻尼比取 $\zeta = 0.05$, 对整个多尺度模型进行混合试验分析。

为了验证所构建的混合试验加载系统具有良好的稳定性和混合试验加载精度, 提取出试验单元控制点的目标指令位移和作动器响应位移作对比分析,

如图 12 所示，目标位移指令和作动器位移响应基本吻合，其绝对误差可控制在 0.015mm 范围内，如图 13 所示。

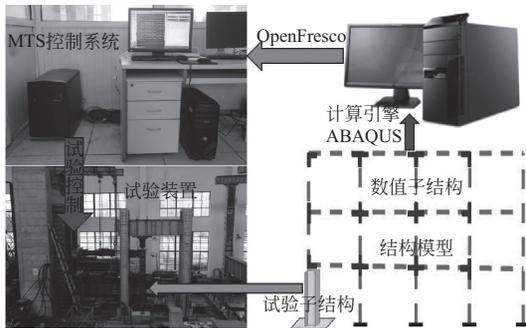


图 9 混合试验系统

Fig. 9 Hybrid simulation system



图 10 试验加载图

Fig. 10 Loading in test

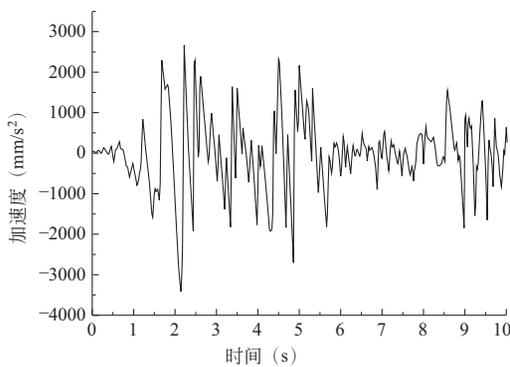


图 11 El-Centro 波加速度时程图

Fig. 11 Acceleration time-history curve of El-Centro wave

为了从宏观上把握结构的地震反应，通过提取混合试验中计算单元的顶层位移和多尺度有限元模数值模拟分析的顶层位移图作对比分析，可以看出在多尺度有限元模型中加入试验单元后其整体的地震响应趋势基本一致，如图 14 所示。说明抗震混合试验方法在加入试验单元后，能够和计算单元实现良好的耦合连接，实现从计算单元到试验单元之间的数据交互。

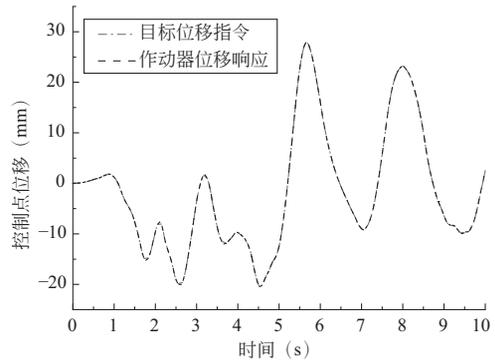


图 12 目标指令位移和作动器响应位移对比图

Fig. 12 Comparison of displacements between objective command and actuator response

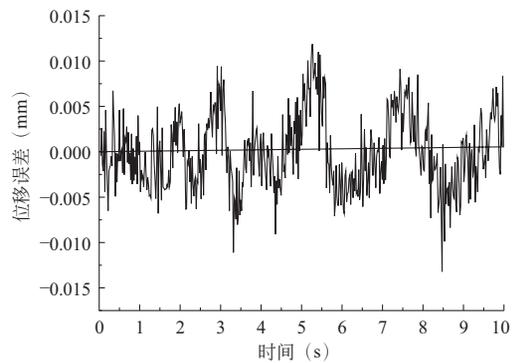


图 13 系统命令-响应位移绝对误差

Fig. 13 Absolute error of command-response

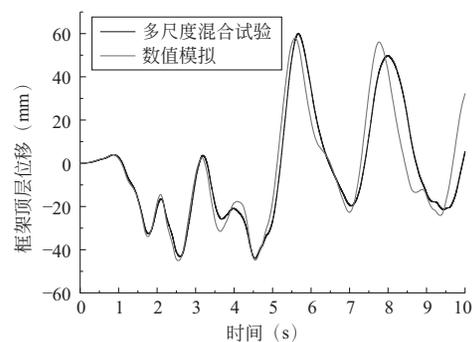


图 14 结构顶层位移曲线对比图

Fig. 14 Comparison of displacement curves of structure top

为了更直观地从结构构件层面研究其抗震性能，选取试件的反力时程曲线并与数值模拟中相应的构件做对比分析，可以看出在试验过程中试件所受到的力和数值模拟中相应构件的力基本吻合，同时也反应了在试验地震时程内结构构件所受到的力的变化情况及其受到的最大荷载，如图 15 所示。选取试验件在地震作用下的力-位移图做分析，可以直观地反应该结构构件在地震作用下的抗震性能，如图 16 所

示。由此可以看出通过混合试验方法，结构在地震作用下所受到的地震力能够在结构构件上真实地得到反应。

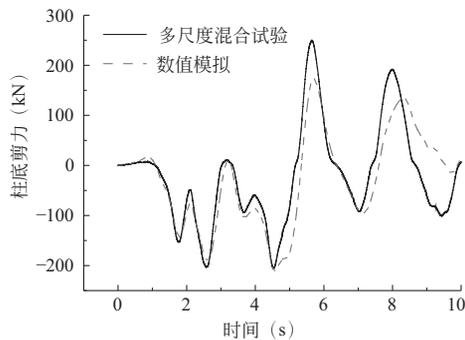


图 15 结构柱底剪力对比图

Fig. 15 Comparison of shear forces at the bottom of structural column

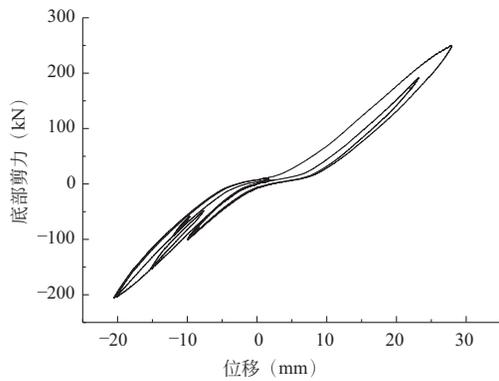


图 16 试验单元滞回曲线图

Fig. 16 Hysteretic curve of experimental element

为了从微观层面对结构进行抗震分析，选取试件底部应变时程曲线及对结构其他部位做分析，如图 17、图 18 所示。可以看出在该地震作用下，试件底部的变形在 1000 个微应变以内，可以判定试件基本还处于弹性范围内。通过对框架节点的云文图，

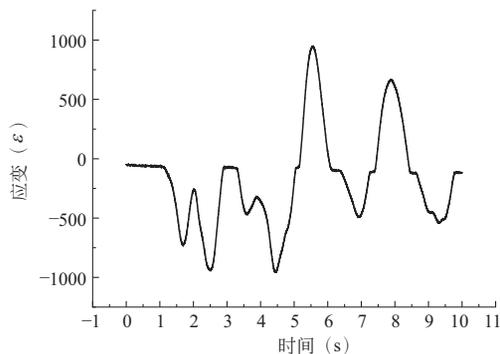


图 17 柱底应变时程图

Fig. 17 Strain time-history at the bottom of the column

还可以对框架其他部位如框架节点的应力、变形等进行分析，如图 18 所示。

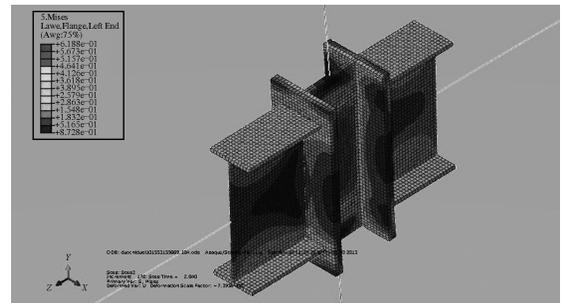


图 18 节点应力分布图

Fig. 18 Nodal stress contour

5 结 论

为了研究多尺度混合试验技术在结构抗震上的应用，以 3 层 4 跨 Benchmark 模型进行混合试验，通过试验结果可得出如下结论：

(1) 所建抗震混合试验系统中有限元分析软件 ABAQUS、OpenFresco 与 MTS 加载系统之间有良好的通讯能力，该混合试验系统具有良好的稳定性和试验加载精度，能够满足抗震混合试验的要求。

(2) 多尺度有限元抗震混合试验将试验单元加入有限元模型中，弥补了人为给定材料特性在有限元分析中不能真实再现结构地震反应的不足。

(3) 多尺度有限元抗震混合试验可以从宏观、微观层面对结构进行抗震性能研究，更加全面地对结构的抗震性能进行分析，为结构抗震分析提供了新的方向。

参 考 文 献

- [1] Schellenberg A, Mahin S A, Fenves G L. A software framework for hybrid simulation of large structural systems [R]. Reston: ASCE, 2007
- [2] Kwon O S, Nakata N, Elnashai A, et al. A framework for multi-site distributed simulation and application to complex structural systems[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2005, 9(5): 741-753
- [3] Kwon O S, Elnashai A S, Spencer B F. A framework for distributed analytical and hybrid Simulations[J]. Structural Engineering & Mechanics, 2008, 30(3): 331-350
- [4] Pan P, Tomofuji H, Wang T, et al. Development of peer-to-peer (P2P) internet online hybrid test system[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2006, 35(7): 867-890

- [5] Wang T, Nakashima M, Pan P. On-line hybrid test combining with general-purpose finite element software [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2006, 35(12): 1471-1488
- [6] Wang T, Yoshitake N, Pan P, et al. Numerical characteristics of peer-to-peer (P2P) internet online hybrid test system and its application to seismic simulation of SRC structure [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008, 37(2): 265-282
- [7] Xiao Y, Hu Q, Guo Y, et al. Network platform for remote structural testing and shared use of laboratories [J]. *Progress In Natural Science*, 2005, 15(12): 1135-1142
- [8] 肖岩, 胡庆, 郭玉荣, 等. 结构拟动力远程协同试验网络平台的开发研究[J]. *建筑结构学报*, 2005, 26(3): 122-129 (Xiao Yan, Hu Qing, Guo Yurong, et al. A network platform for remote pseudo-dynamic testing [J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(3): 122-129 (in Chinese))
- [9] Wu B, Bao H, Ou J, et al. Stability and accuracy analysis of the central difference method for real-time substructure testing [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2005, 34(7): 705-718
- [10] Nakata N, Spencer B F, Elnashai A S. Multi-dimensional mixed-mode hybrid simulation, control and applications [M]. Illinois: University of Illinois at Urbana-Champaign, 2007
- [11] Hashemi M J, Al-Mahaidi R, Kalfat R, et al. Development and validation of multi-axis substructure testing system for full-scale experiments [J]. *Australian Journal of Structural Engineering*, 2015, 16(4): 302-315
- [12] 曾聪, 吴斌, 许国山, 等. 结构多轴抗震试验加载系统开发及控制策略研究 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(2): 1-6 (Zeng Cong, Wu Bin, Xu Guoshan, et al. Research on multi-axial dynamic structural testing system and its control strategies [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(2): 1-6 (in Chinese))
- [13] Hashemi M J, Mosqueda G. Innovative substructuring technique for hybrid simulation of multistory buildings through collapse [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2014, 43(14): 2059-2074
- [14] Mahmoud H N, Elnashai A S, Spencer B F, et al. Hybrid simulation for earthquake response of semirigid partial-strength steel frames [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2013, 139(7): 1134-1148
- [15] Murray J A, Sasani M, Shao X. Hybrid simulation for system-level structural response [J]. *Engineering Structures*, 2015, 103: 228-238
- [16] Chae Y, Park M, Kim C Y, et al. Experimental study on the rate-dependency of reinforced concrete Structures using slow and real-time hybrid simulations [J]. *Engineering Structures*, 2017, 132: 648-658

李双江(1987—),男,硕士,实验师。主要从事结构抗震试验方法研究。

田石柱(1962—),男,博士,教授。主要从事主要研究方向为结构抗震试验方法、结构振动控制和结构智能健康监测等。