

文章编号:1007-6069(2017)01-0010-08

# 基于通用有限元软件的混合模拟 试验两种实现方法与分析

苏丹,闫维明,陈适才

(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 100124)

**摘要:**根据混合模拟试验理论,将其基于通用有限元软件的实现方式归结为分离式及整体式。为了对比分析这两种实现方法,利用 MATLAB 编写数值积分算法及与 OpenSees 的数据接口程序,并应用其在局域网内的网络通讯功能,建立了混合模拟试验的数值仿真系统。通过对单自由度结构和多自由度结构的模拟试验进行的分析和验证,对比分析了两种实现方法的利弊,为后续实验室进行物理试验提供参考依据。

**关键词:**混合模拟试验;数值模拟;OpenSees;MATLAB;

**中图分类号:**TU317.9

**文献标志码:**A

## Two realization methods of hybrid simulation test based on general finite element software and their analyses

SU Dan, YAN Weiming, CHEN Shicai

(Beijing Key Laboratory of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** According to theory of hybrid simulation test, its general finite element software-based realization way is divided into separate and integral types. For comparative analysis of these two methods, numerical simulation system of hybrid simulation test was constructed, by using MATLAB to write the programs of numerical integration algorithms and data interface with OpenSees, and using its capabilities for LAN communication. Through the analysis and verification of single degree of freedom and multi-DOF structure simulation tests, this paper compares and analyzes the advantages and disadvantages of the two methods, which provide a reference for the subsequent physical experiment in laboratory.

**Key words:** hybrid simulation test; numerical simulation; OpenSees; MATLAB

## 引言

混合模拟试验技术作为一种高效和低成本的结构体系抗震评估方法,得到了越来越多的重视。在一个典型的混合模拟试验中,整体结构被分成试验子结构和数值子结构。混合模拟试验由求解整体结构的动力平衡方程开始,在之后的时间步求解中,用在试验室中进行的试验子结构替代其在整体结构中的原数值结构,子结构之间通过专门的接口实现数据的交互,即数值子结构向试验子结构发送目标位移,测量试验子结

收稿日期:2015-01-16; 修订日期:2015-04-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51378039)

作者简介:苏丹(1989-),男,硕士研究生,主要从事结构抗震与减震控制研究. E-mail:sudan89@foxmail.com

构的恢复力返回数值子结构,再进行下一时间步的结构动平衡方程计算。根据混合模拟试验技术的理论,将基于有限元软件的混合模拟试验数值部分的实现方式划分为:分离式结构和整体式结构。两者的主要区别在于是否利用有限元软件进行结构动平衡方程的求解<sup>[1-3]</sup>。

在分离式结构实现方式中,有一个专门的协调器来运行混合模拟试验,承担整体结构的动平衡方程求解,数值子结构和试验子结构分别外包给有限元软件和物理试验室。这种结构的优点是:所有的子结构在中间协调器组成整体结构动平衡方程,在协调器中数值子结构和试验子结构之间无显著差异,因此可以比较容易地对整体结构分割得到子结构<sup>[4-6]</sup>,如图 1 所示。

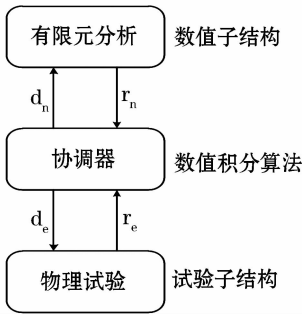


图 1 分离结构

Fig. 1 Separate structure

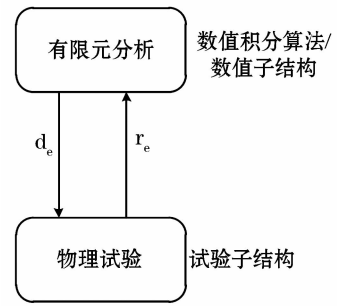


图 2 整体式结构

Fig. 2 Integral structure

整体式结构实现方式没有明确的协调器,视有限元软件为主要程序,开发相应接口处理与物理试验室的通信。在此实现方式中,数值结构的动平衡方程在有限元软件中计算,试验子结构被视为外包部分。这种结构的优点在于它不要求数值子结构的数据网络通信,适用于较复杂结构的混合模拟试验<sup>[7-9]</sup>,如图 2 所示。其中: $d_e$ :试验子结构目标位移; $d_n$ :数值子结构目标位移; $r_e$ :试验子结构反馈恢复力; $r_n$ :数值子结构反馈恢复力。

为了对比分析此两种实现方法,本文针对分离式结构利用 MATLAB 编写数值积分算法及与 OpenSees 数据接口程序;针对整体式结构编写在 OpenSees 施加力边界条件的数据接口。将在不同客户端的子结构利用 MATLAB 局域网网络通讯功能建立通信,建立了混合模拟试验的数值仿真系统。随后通过单自由度结构和多自由度结构的模拟试验进行的分析和验证,对比分析了两种实现方法的利弊,为后续实验室进行物理试验提供参考依据。

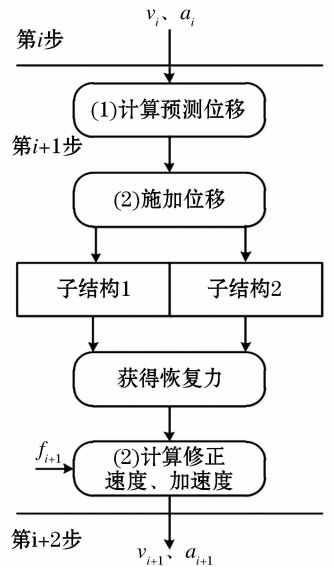


图 3 系统流程图

Fig. 3 System flowchart

## 1 基于 OpenSees 的混合模拟试验分离式实现方法

### 1.1 分离式协调器数值积分算法

在分离式协调器中本文采用  $\alpha - OS$  算法作为求解动平衡方程的数值积分算法,避免在子结构边界处的平衡迭代。其具体过程分 3 步:

(1) 首先计算  $n + 1$  步的预测位移与预测速度,

$$\tilde{d}_{n+1} = d_n + \Delta t v_n + \Delta t^2 (0.5 - \beta) a_n \quad (1)$$

$$\tilde{v}_{n+1} = v_n + \Delta t (1 - 2\gamma) a_n \quad (2)$$

(2) 将计算得到的预测位移施加到子结构数值模型并测得反力,代入动平衡方程求解  $n + 1$  步的加速度,

$$\bar{M} \cdot a_{n+1} = \bar{P}_{n+1}, \bar{M} = M + \gamma \Delta t (1 - \alpha) C + \beta \Delta t (1 + \alpha) \tilde{K} \quad (3)$$

$$\bar{P}_{n+1} = (1 + \alpha) P_{n+1} - \alpha P_n + \alpha \tilde{r}_n (1 - \alpha) \tilde{r}_{n+1} + \alpha C \tilde{v}_n - (1 + \alpha) C \tilde{v}_{n+1} + \alpha (\gamma \Delta t C + \beta \Delta t^2 \tilde{K}) a_n \quad (4)$$

(3) 依据加速度计算修正位移与修正速度,求解下一步预测位移,循环直至求得整个地震时程响应。

$$\mathbf{d}_{n+1} = \tilde{\mathbf{d}}_{n+1} + \Delta t^2 \boldsymbol{\beta} \mathbf{a}_{n+1} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{n+1} = \tilde{\mathbf{v}}_{n+1} + \Delta t \boldsymbol{\gamma} \mathbf{a}_{n+1} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{d}$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{a}$  分别表示位移、速度、加速度向量,下角标表示时间步;  $\Delta t$  为时间步长;  $\tilde{\mathbf{d}}_{n+1}$  为  $n+1$  步预测位移;  $\mathbf{d}_{n+1}$  为  $n+1$  步修正位移;  $\mathbf{M}$  为结构质量矩阵;  $\mathbf{C}$  为结构阻尼矩阵;  $\mathbf{r}_{n+1}$  为  $n+1$  步结构反力向量;  $\mathbf{P}$  为结构外荷载向量包括地震荷载作用,  $\boldsymbol{\beta}$ 、 $\boldsymbol{\gamma}$  为计算参数,具体表达式为:

$$\boldsymbol{\beta} = (1 - \alpha)^2/4, \boldsymbol{\gamma} = (1 - 2\alpha)/2, \alpha \in [0, 1/3], \quad \text{计算中 } \alpha \text{ 取 } 1/6 \quad (7)$$

公式(4)是使用 OS 数值积分方法避免求解结构瞬时刚度,是将基于对结构反力  $r_{n+1}$  的近似,即结构的实际响应值与线性值得偏差近似,如公式(8)所示,代入公式(9)  $\alpha$  方法的运动平衡方程得到。

$$\mathbf{r}_{n+1} \cong \tilde{\mathbf{K}} \mathbf{d}_{n+1} + (\tilde{\mathbf{r}}_{n+1} - \tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{d}}_{n+1}) \quad (8)$$

$$\mathbf{M} \mathbf{a}_{n+1} + (1 + \alpha) \mathbf{C} \mathbf{v}_{n+1} - \alpha \mathbf{C} \mathbf{v}_n + (1 + \alpha) \mathbf{r}_{n+1} - \alpha \mathbf{r}_n = (1 + \alpha) \mathbf{P}_{n+1} - \alpha \mathbf{P}_n \quad (9)$$

$\tilde{\mathbf{K}}$  为预测刚度矩阵,一般情况下近似于结构弹性刚度。  $\tilde{\mathbf{r}}_{n+1}$  为施加预测位移后测得的结构恢复力向量<sup>[10]</sup>。流程过程如图3所示。

## 1.2 OpenSees 控制方法

利用 OpenSees 重启动功能进行数值子结构的分析,即当前步的求解能继续之前的求解历史,这样能保证整个地震动时程的求解过程。具体计算时,每个数值子结构建立两个 OpenSees 的模型文件:一个为初始模型文件,包括节点、边界、单元、材料模型信息,位移施加命令和分析命令信息;另一个为重启动文件,包括位移施加命令和分析命令信息。在试验的第1步,调用 OpenSees 运行初始模型文件,而后每步都运行重启动文件。

OpenSees 的重启动文件输出命令为:save \$i;重启动文件读取命令为:restore \$i。重启动读取命令在 TCL 文件的开头,重启动输出命令在 TCL 文件的结尾。因 OpenSees 的模型文件是用 TCL 脚本语言书写,在 TCL 文件中可直接定义将需要的数据存储的位置,并可以保存为.out、.txt 等各种文件格式,因此可以极为方便的被 MATLAB 修改和调用<sup>[6]</sup>。

## 1.3 MATLAB 协调程序

基于 MATLAB 开发的混合模拟试验系统协调程序,其主要功能包括:传输通过数值积分算法求解的每个时间步结果,根据计算的结果修改 TCL 模型文件,调用 OpenSees 运行 TCL 模型文件,提取需要的结果数据进行下一步数值计算。局域网网络通信利用 MATLAB 提供的 TCP/IP 网络通信服务功能,采用客户端/服务端模式。

# 2 分离式结构模拟试验与算例

## 2.1 单自由度线性结构

以单自由度线性结构为整体结构,其具体形式与尺寸、材料特性如图(4)和表(1)所示。对进行的数值模拟试验,具体而言就是分别建立两个子结构1、2的数值模型,通过有限元软件 OpenSees 分别在两台电脑上模拟计算,应用 MATLAB 的网络通信功能实现在 TCP/IP 上的数据通信。整体结构简化为单自由度体系,可以忽略子结构3轴向变形,因此取相对于子结构1、2比较大的刚度,直接代入协调器动平衡方程的整体刚度矩阵中。使用 El Control 地震波,调整峰值取 300 Gal,时间间隔 0.02 s,计算前 5 s,节点1、2附加质量 5 000 kg。

表1 梁柱截面尺寸

Table 1 Cross-section sizes of beam and column

类型	材料弹模/MPa	截面/m	长度/m
梁	取相对大值	0.2 × 0.4	5
柱	3.25 × 10 <sup>4</sup>	0.2 × 0.2	3

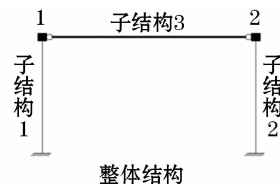


图4 单自由度线性结构

Fig.4 SDOF linear structure

实现步骤具体如下:

- (1) 获取结构质量,刚度矩阵,调整协调器,检查网络连接;
- (2) 协调器计算出子结构的目标位移,传送给各数值子结构 1、2;
- (3) 数值子结构运行有限元分析软件 OpenSees 进行位移加载分析;
- (4) 协调器从运算结果中将反力提取出来,求解加速度值;
- (5) 根据所求加速度值计算出当前步的修正位移,修正速度;
- (6) 回到第(2)步,计算下一步的目标位移,如此循环计算下去。

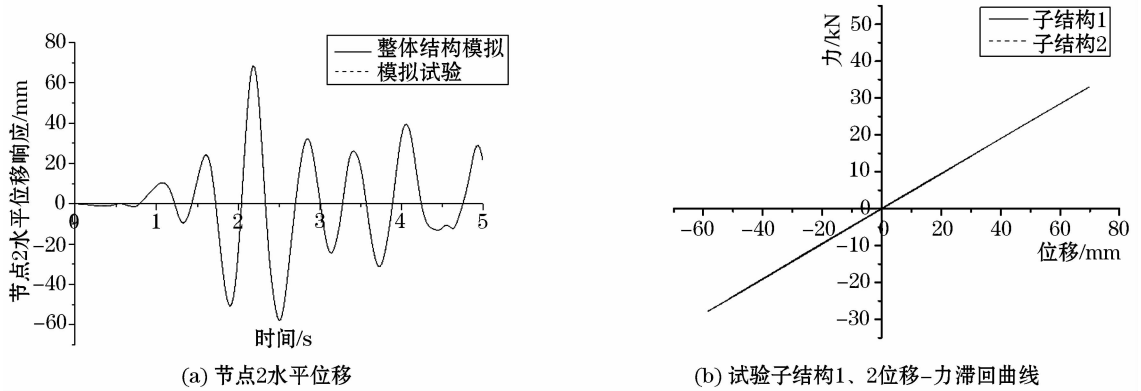


图 5 单自由度结构地震响应  
Fig. 5 Seismic responses of SDOF structure

从模拟试验与整体结构模拟结果对比可以看出,结构水平位移响应吻合很好。因此在分离式结构协调器中,使用  $\alpha - OS$  算法求解结构动力平衡方程,可以达到很好的精度与稳定性。为进一步验证所编写程序的适用的,进行多自由度非线性结构的模拟试验。

### 2.2 多自由度非线性结构

多自由度非线性结构的形式与尺寸、材料特性如图(6)和表(2)所示。将整体结构在梁的一半处分成两个子结构,因此对于求解的动力平衡方程可以认为有 3 个有效自由度,即水平位移,竖向位移和转角位移。同样,将两个子结构分别建立数值模型,通过有限元软件进行数值计算。使用 El Centro 地震波,调整峰值取 400 Gal,时间间隔 0.02 s,计算前 5 s,节点附加质量 50 000 kg。

表 2 梁柱截面尺寸

类型	材料	截面/m	长度/m
梁	混凝土 C35	0.2 × 0.3	5
	钢筋 HRB335	Φ20 × 3	
柱	混凝土 C35	0.2 × 0.2	3
	钢筋 HRB335	Φ20 × 4	

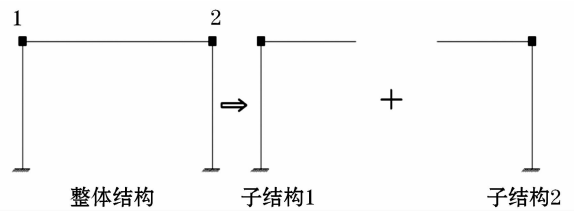


图 6 多自由度非线性结构  
Fig. 6 Multi-degree of freedom nonlinear structure

从模拟试验与整体结构模拟结果对比可以看出,水平位移与转角位移吻合比较好,但是竖向位移仍有些差别。这主要是因为结构动平衡方程中整体刚度矩阵是先通过对每个子结构在 OpenSees 加载单位位移获得每个子结构刚度矩阵,再把两个子结构的刚度矩阵组合成整体刚度矩阵,这样得到的刚度矩阵并不是严格对称的,因此在赋予动平衡方程整体刚度矩阵时,进行对称化处理,造成了竖向位移的偏差;此外  $\alpha - OS$  算法在处理静力自由度,如竖向位移时,也是有一定程度的影响。通过对多自由非线性结构的模拟试验,进一步验证了通过  $\alpha - OS$  算法构建的混合试验系统的运行,可以达到较好的精度与稳定性。

分离式结构混合模拟试验,对于更复杂体系的应用原理也是如此,这里也不在赘述。只是,随着自由度增加,对协调器要求也就越高,即是对其中的核心部分——数值积分算法稳定性的要求,在采用通常的隐式

算法时,需要对边界平衡条件进行多次迭代来获取更加准确的解。

不过,在分离式结构中,协调器构建的整体结构动平衡方程是基于集中质量法,把有效自由度向边界凝聚,构建整体结构动平衡方程时,为提前获取质量和刚度矩阵,不可避免的要进行模型简化。所以目前国内外的研究也主要集中在简单的平面框架结构,对于拥有更多自由度的结构或三维空间结构分离式结构的适用性还需要做进一步研究和模拟验证。

分离式结构的数值子结构的静力分析,利用的是 OpenSees 中的位移加载方式,相当于把传统子结构试验中数值部分,应用有限元软件来模拟计算,所求恢复力值在一定程度上趋于准确,但是对于有些结构要求速度、加速度的特性并没有体现出来,未充分地利用有限元软件求解功能。而整体式结构求解运动方程是在有限元软件中,能更加容易得到结构的位移、速度、加速度的地震响应。

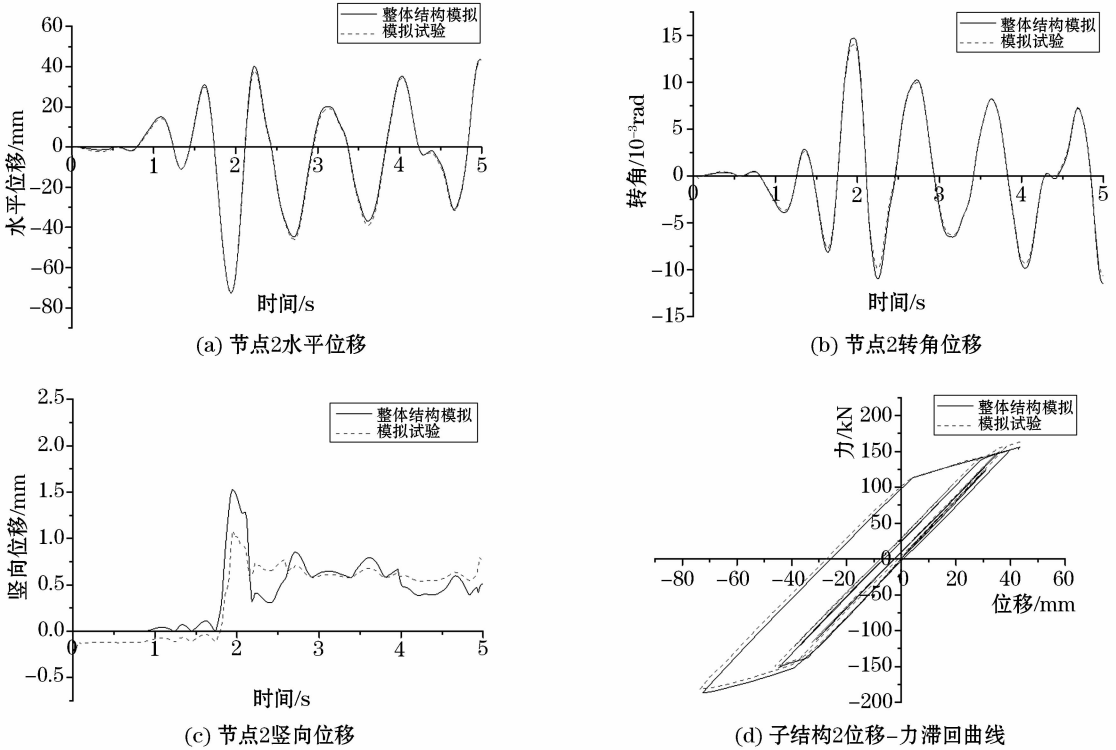


图7 多自由度结构地震响应

Fig. 7 Seismic responses of multi-degree of freedom structure

### 3 整体式结构模拟试验与算例

#### 3.1 单层桁架结构

整体式混合模拟试验系统是在整体结构数值模型中定义替代单元,替代试验子结构部分,提取替代单元端部位移,施加于试验子结构边界处,获取恢复力作为边界力条件施加给数值子结构。首先,采用单层桁架结构做整体结构进行模拟试验,结构具体形式与尺寸、材料如图(8)和表(3)所示,子结构1作为主要子结构,在其数值模型中定义桁架单元替代子结构2,进行动力时程分析。同样,模拟试验是两个子结构都在有限元软件中计算。考虑数值算法的稳定性,取 Loma Prieta 地震波,时间间隔 0.005 s,取前 5 s 计算,调整峰值取 200 Gal,结构节点附加质量块 51 000 kg。

表3 梁柱截面尺寸

Table 3 Cross-section sizes of beam and column

类型	材料弹模/MPa	截面/mm	长度/mm
梁	$3.25 \times 10^4$	200 × 400	5 000
柱	$3.25 \times 10^4$	200 × 200	3 000

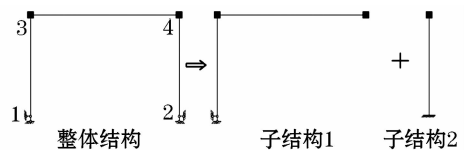


图8 单层桁架结构

Fig. 8 One-story truss structure

程序流程可以简述为:

- (1) 检查网络连接;
- (2) 假定在时间步  $i=1$  时的子结构 2 反力为 0, 计算子结构 1 在外荷载作用下子结构 1 和子结构 2 交接面的位移, 并传给子结构 2;
- (3) 根据计算得到的位移施加于子结构 2, 测量子结构 2 达到施加位移  $i$  时的反力, 然后把反力传给子结构 1;
- (4) 计算在子结构 1 的反力和外荷载的作用下, 子结构 1 和子结构 2 交接面的当前步的位移, 然后把此位移再次传给子结构 2;
- (5) 令  $i = i + 1$  重复第(3)步和第(4)步, 直至试验结束。

从模拟试验与整体结构模拟结果对比可以看出, 结构水平位移响应吻合较好, 差值在可以接受范围内。对于节点处的加速度、速度响应, 在峰值处存在偏差, 整个曲线吻合很好, 说明了系统具备较好的协调功能。不过, 单层桁架结构采用的弹性材料, 在计算过程中都是处在弹性阶段, 为了进一步验证系统的适用, 进行两层支撑框架较复杂结构验证。

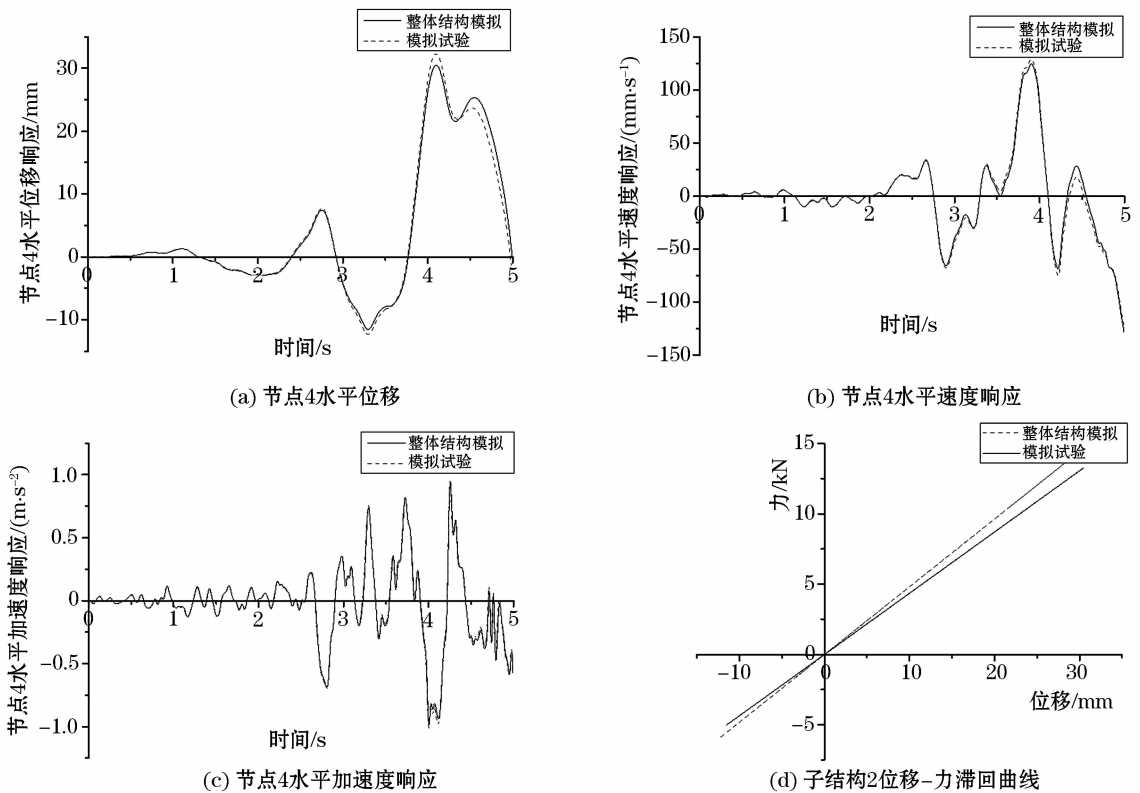


图9 单层桁架结构地震响应

Fig.9 Seismic responses of one-story truss structure

### 3.2 两层支撑框架结构

采用一个两层单跨混凝土框架支撑结构形式为整体模型进行了模拟试验, 将数值模型进行简化处理, 只考虑支撑轴向力, 具体结构形式如图(10)和表(4)所示。将整体结构拆分成框架和斜撑两个子结构, 两个子结构都在有限元软件中进行数值分析, 子结构 1 作为主结构, 输入 Loma Prieta 地震波, 时间间隔 0.005 s, 调整峰值取 300 Gal, 计算前 10 s, 节点附加质量 51 000 kg。

将整体结构动力分析结果和模拟试验的结果进行对比分析, 可以看出, 两者吻合比较好, 存在的偏差在可以接受范围内。结合单层桁架算例, 说明所编写系统具有一定适用性。通过对整体式结构进行模拟试验, 验证了采用替代单元, 通过子结构边界处的位移与恢复力的数据传递, 进行混合模拟试验, 是一种比较可行的设计思路。不过, 文中对整体式结构的适用性研究, 主要集中在对线性结构的分析, 对于非线性特性比较明显的结构采用整体式结构形式进行混合模拟试验还需做更多修正与验证。

表4 梁柱/支撑截面尺寸

类型	弹模/MP	截面/mm	长度/mm
梁	$3.25 \times 10^4$	200 × 400	5 000
柱	$3.25 \times 10^4$	200 × 200	3 000
支撑连接段	$2.05 \times 10^4$	15 × 180 十字型	583 × 2
支撑耗能段	$2.05 \times 10^4$	15 × 120 一字型	4 664

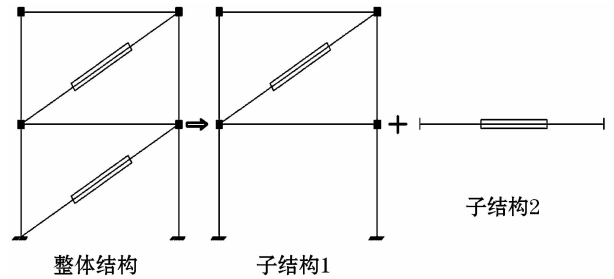
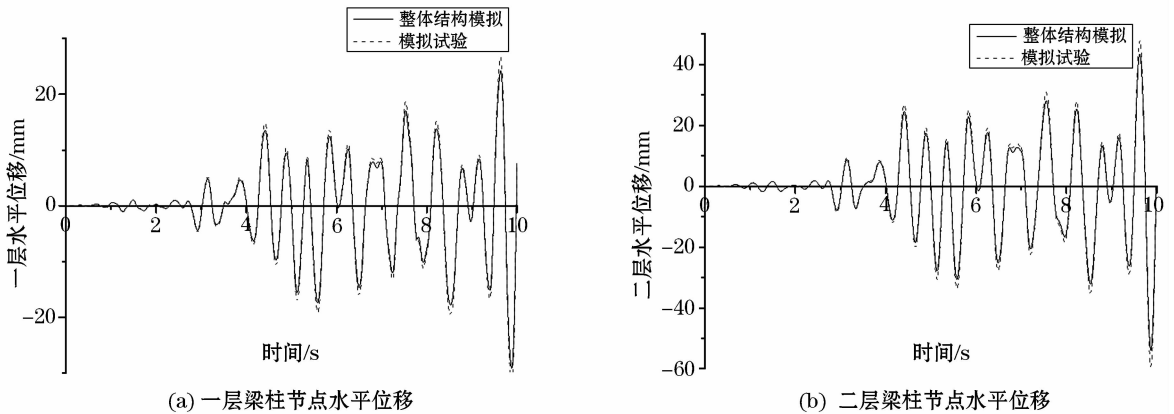


图10 支撑框架结构

Fig. 10 Braced frame structure



(a) 一层梁柱节点水平位移

(b) 二层梁柱节点水平位移

图11 支撑框架结构地震响应

Fig. 11 Seismic responses of braced frame structure

## 4 结论与展望

通过对混合模拟试验系统数值部分的仿真模拟,讨论了混合模拟试验可实现的两种方式。分离式结构注重有限元软件与试验设备的广泛性和通用性结合,在一般实验室更具可行性。其关键在于开发中间协调器,实现试验子结构和数值子结构界面自由度的位移和恢复力的数据交互。核心在于数值积分算法选择和迭代算法优化,不过应用现在已有的算法,面对多自由度或空间结构,难免会造成效率和准确性降低。

整体式结构是有限元软件在试验中直接的应用,将整体结构数值模型中的试验子结构部分用相应的单元替代,应用接口程序实现有限元软件与试验设备之间的通信。这无疑对有限元软件功能的要求更高,有限元软件除了能计算数值子结构的质量,阻尼和刚度及动力方程求解,更要可以准确获取每一时间步试验子结构特性的更新。对比而言,整体式结构是比分离式结构具有优势的实现思路,其充分地利用了有限元软件求解动力方程,并容易实现较复杂结构体系的混合试验。

作为一种试验方法,其目的是为了试验研究。本文目前只进行了模拟试验来论证所提出思路的可行性,未进行真实试验,至于进行真实试验得到的结果是否理想还有待考证。因此,结合现阶段成果,利用目前实验室已有硬件设备,如:液压控制系统、数据采集系统等,构建混合模拟试验系统闭合回路,进行真实结构的物理试验是需要突破的地方。

## 参考文献

- [1] 邱法维. 结构抗震实验方法进展[J]. 土木工程学报, 2004,37(10): 19-27.  
QIU Fawei. Developments of seismic testing methods for structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2004,37(10): 19-27.
- [2] 肖岩, 易伟建. 结构实验学的发展[J]. 建筑结构学报, 2009,30(6): 16-22.  
XIAO Yan, YI Weijian. Evaluation of structural experimentation [J], Journal of Building Structures, 2009,30(6): 16-22.
- [3] MAHIN S A, SHING P B. Pseudo-dynamic method for seismic testing [J]. ASCE Journal of Structural Engineering, 1985, 111(7): 1482-1501.

- [4] 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 and Structural Dynamics*, 2008, 37(2):265–282.
- [5] 陈永盛,吴斌. 基于 Simulink 的混合试验系统及其验证[J]. *振动与冲击*,2014,33(7):18–23.  
CHEN Yongsheng, WU Bin. Simulation and validation of a hybrid testing system with Simulink[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014,33(7):18–23.
- [6] 王涛,程春. 一种非迭代式的分布式子结构混合试验方法[J]. *工程力学*,2013,30(3):198–205.  
WANG Tao, CHENG Chun. A non-iterative distributed substructure online hybrid test method [J]. *Engineering Mechanics*, 2013,30(3):198–205.
- [7] TAKAHASHI Y, FENVES G L. Software framework for distributed experimental-computational simulation of structural systems[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2006, 35(3):267–291.
- [8] SCHELLENBERG A, KIM H K, TAKAHASHI Y, et al. OpenFresco Command language Manual[M]. The Regents of the University of California, 2009: 5–34.
- [9] NARUTOSHI Nakata (chair), SHIRLEY J DYKE, JIAN Zhang, et al. Hybrid Simulation Primer and Dictionary [C]//Hybrid Simulation Task Force, West Lafayette, America, 2014.
- [10] NAKASHIMA, AKAZAWA T, SAKAGUCHI O, et al. Integration method capable of controlling experimental error growth in substructure pseudo-dynamic Test [J]. *Journal of Structural Construction Engineering*. AIH,1993(454):61–71.