

RC 隔震框架缩减自由度子结构耦合混合试验研究

陈睦锋¹, 刘文光¹, 褚 濛², 李韶平², 潘 鹏³

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海 200233;
3. 清华大学土木工程系, 北京 100084)

摘要: 本文提出基于 GPU 并行计算、缩减自由度及考虑隔震支座非线性耦合力学特性的隔震结构混合试验模拟方法, 准确地评估地震作用下隔震层橡胶隔震支座与上部结构耦合的真实响应特点。通过数值模拟的方法对上部结构各楼层的恢复力性能进行分析, 将上部结构简化为非线性 MDOF 剪切模型; 结合隔震支座的拟静力试验建立考虑非线性耦合的隔震支座模型, 得到该结构的缩减自由度子结构耦合混合试验数值模型, 通过橡胶隔震支座的动力试验和子结构交互计算进行不同地震作用下 RC 隔震框架的混合模拟试验研究。试验结果表明: 10 层 RC 隔震结构的混合试验中, 隔震层变形与数值模拟计算结果吻合较好, 利用混合试验方法对结构自由度进行缩减, 既能较好地还原上部结构的动力特性, 也能得到橡胶隔震支座在地震作用下的真实响应, 且保证了较好的分析速度和精度。

关键词: 隔震结构; 混合试验分析; 静力分析; 自由度缩减

中图分类号: TU352.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)05-1402-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.05.024

引 言

结构抗震性能的试验测试技术在过去十余年经历了重大的发展。对于结构的抗震性能研究, 通常采用结构抗震试验分析或者数值模拟的方法。目前对于结构动力特性的分析, 主要采用缩尺的振动台试验进行模拟, 但振动台的台面尺寸和承载力决定了其仅能实现较小缩尺比的模型试验^[1]。为验证大型结构构件或足尺减隔震元件在主体结构中的动力特性, 可将抗震试验分析与数值模拟的方式相结合, 该方法可准确且经济地还原构件在地震作用下结构中的真实动力响应。通常结构在地震中的破坏仅发生在薄弱部位, 采用主子结构的混合试验分析, 可将需关注的构件进行大比例尺甚至足尺模型试验, 而对于处于非研究关注的结构部分, 利用已有研究成果, 并采用计算机数值模拟的方式进行主子结构混合试验^[2]。

国内外学者对于主子结构的混合试验已有较多研究。在混合试验方法改进方面, 蔡新江等^[3]对高层建筑长周期的子结构进行地震反应试验研究, 基于传递函数和橡胶垫-质量块装置两种手段改进了子结构振动台试验方法; Ahmadizadeh 等^[4]对实时混合模拟中作动器的时滞性进行了动力学修正补偿;

Cheng 等^[5]提出了一种双补偿的方法, 在逆补偿的基础上对作动器控制误差施加一个增益比例, 增加了作动器的跟踪能力。Shao 等^[6]提出了一种基于卡尔曼滤波器的实时混合仿真在线模式修正方法和实现过程, 可较快实现系统滞回模型的计算收敛。在混合试验应用方面, Sarebanha 等^[7]利用超高性能计算平台, 并采用并行计算处理, 对大型自由度结构进行足尺隔震支座的实时混合模拟, 得到了足尺隔震支座在地震作用下的真实动力响应特点; 谭晓晶等^[8]采用子结构拟动力试验方法对 6 层装配式钢筋混凝土盒子结构的抗震性能进行试验验证; Chae 等^[9]通过实时混合模拟, 验证了足尺钢筋混凝土结构对加载速率的依赖性较小。

在试验技术方面, 在建筑物/构筑物底部设置隔震元件, 通过隔震元件拉长整体结构的周期, 降低整体结构的地震响应。目前, 国内外^[10-12]已有大量关于该技术的理论计算方法和工作机理研究成果。近年来, 也有学者提出基础隔震在混合试验技术中的应用, 如黄襄云等^[11]通过混合试验将新型钢滚轴隔震支座与阻尼装置配套使用并验证了该方法的有效性; 彭天波等^[13]利用结构集中质量对 LNR 橡胶支座进行实时混合试验, 得到 LNR 橡胶支座在地震作用下的动力响应特点。Lin 等^[14]将上部结构进行线性简化, 运用实时混合试验呈现配置了变曲率摩擦摆

系统的液化天然气(LNG)储罐的地震响应。Yang等^[15]使用OpenSees进行数值建模分析,使用OpenFresco测试系统与数值模型之间的通信,利用混合仿真方法,采用振动台和执行器来评估单跨梁桥的抗震性能。Del Carpio等^[16]研究了涉及大规模物理子结构和高度非线性数值模型的大型复杂结构系统混合模拟集成方法,探究了地震作用下结构倒塌问题中的性能。Chae等^[17]为了实现对非线性伺服液压系统的改进控制,提出了一种自适应时间序列(ATs)补偿器,并通过一个大型3层钢框架结构与大型磁流变(MR)阻尼器的实时混合仿真得到了呈现。

基础隔震的混合试验技术逐渐成熟并得到越来越多的认可和应用,但地震工程的发展也对子结构混合试验技术提出了更多的要求。为了更充分地考虑隔震结构上部结构非线性对隔震层性能的动力耦合响应,和上部结构非线性对隔震支座的性能影响,减小非线性数值子结构与作动器交互带来的时滞性,本文提出基于GPU并行分析的自由度缩减的子结构混合试验方法,针对性地分析隔震支座在整体结构中的真实响应。

1 隔震结构混合试验并行分析方法

1.1 基于GPU并行分析的混合试验方法

采用评估整体结构体系以及关键试验构件的动态特性的主子结构混合试验时,可将整体结构集成于统一的结构运动方程中,并使用相同的时间积分方案求解该动力方程。根据达朗贝尔原理,混合试验动力方程表达式为:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + (K_m + K_s)x = F_g \quad (1)$$

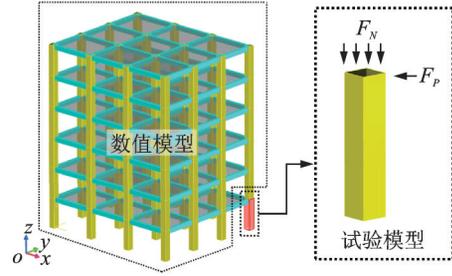
式中 M 和 C 分别为整体结构的质量和阻尼系数; K_m 为数值结构的刚度; K_s 为试验子结构刚度; F_g 为结构所受荷载; x 为结构的位移向量。

由于子结构试验的结构恢复力是通过试验反馈测试得到的,令 $f_s = K_s x$, 并将方程的时间域进行离散,则第 i 步的混合试验动力方程可变为:

$$M\ddot{x}_i + C\dot{x}_i + K_m x_i = M\ddot{x}_{gi} - f_{si} \quad (2)$$

式中 \ddot{x}_{gi} 为第 i 步的地震加速度,子结构试验中可在每一步中测试得到 f_{si} , 并将其反馈到数值模型中进行计算,数值模型可采用模式叠加法或直接分析法对每一步的结构动力特性进行求解。

混合试验原理示意图如图1所示。为减小非线性数值子结构与作动器交互带来的时滞性,可采用力的方式改进递推计算交互,由式(2)可得到第 n 步的递推动力方程为:



注: F_N 和 F_D 分别为试验子结构受到的轴力和水平力

图1 混合试验原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mixing test principle

$$M\ddot{x}_n + C\dot{x}_n + Kx_n = F_n \quad (3)$$

式中 K 为整体的结构刚度矩阵,包括数值结构和试验子结构刚度部分; $F_n = M \cdot \ddot{x}_{gn} - f_{sn}$, 则质量阵 M 为对角矩阵,通过对该方程进行改写可得:

$$M\ddot{x}_n = F_n - F_{intn} \quad (4)$$

$$F_{intn} = C\dot{x}_n + Kx_n \quad (5)$$

通过式(3)可得整体结构模型中第 m 个节点的等效惯性力为:

$$F_{intm,n} = (x_m - x_{m-1})k_m + (x_m - x_{m+1})k_{m+1} + (\dot{x}_m - \dot{x}_{m-1})c_m + (\dot{x}_m - \dot{x}_{m+1})c_{m+1} \quad (6)$$

式中 k_m, k_{m+1} 和 c_m, c_{m+1} 分别为第 m 个节点两个相邻单元在当前时刻的刚度和阻尼。

通过式(6)和(7)可得各节点加速度为:

$$\ddot{x}_n = \frac{F_n - F_{intn}}{M} \quad (7)$$

在时域内进行“蛙跳格式”的中心差分法,即可得到下一步的速度和位移:

$$\dot{x}_{n+\frac{1}{2}} = \dot{x}_{n-\frac{1}{2}} + \frac{1}{2} \left(\Delta t_{n+\frac{1}{2}} + \Delta t_{n-\frac{1}{2}} \right) \ddot{x}_n \quad (8)$$

$$x_{n+1} = x_n + \dot{x}_{n+\frac{1}{2}} \Delta t_{n+\frac{1}{2}} \quad (9)$$

利用该方法结合缩减自由度模型,在数值模型的计算中可不再集成数值结构的刚度矩阵和阻尼矩阵,避免了求解时刚度矩阵求逆奇异导致求解不收敛,致使混合试验中断。所有节点的内力和变形计算均可以力的方式施加和并行计算,对于节点施加的等效惯性力,是以当前步的构件刚度和构件阻尼进行合成。加快了混合试验中数值模型非线性结构的计算,使试验模型和非线性数值模型之间实时交互与数据传递处理更高效。

基于上述方法,可采用GPU(图形处理器)对各节点动力计算进行快速并行计算。使用MATLAB的PCT(Parallel Computing Tool)工具箱进行并行计算,PCT工具箱支持CPU或GPU的并行计算功能。利用gpuArray函数初始化每个相关节点的等效惯性力和质量进入GPU的数据格式,并将数据储存于GPU中进行计算^[18]。

1.2 数值子结构计算

在隔震混合试验分析中,为了使非线性数值子结构的计算适配试验子结构的试验数据采集,并且关注隔震试验子结构在地震中的动力响应,需要考虑上部结构非线性性能对隔震试验子结构的影响。为了确保较高的分析精度并提高分析效率,将隔震结构简化成非线性多质点模型。在进行隔震结构混合试验时,利用GPU对数值子空间进行计算加速,以适配试验子结构的数据传递。

1.3 上部结构数值子结构的构成

为了提升混合试验时数值计算的效率,可将原数值模型按楼层进行子结构划分,对整体结构方程进行降阶。由于各个子结构(楼层)内部存在相对独立性,因此对上部结构各楼层进行静力推覆分析,得到各楼层的能力曲线,使得后期混合试验的子结构动力计算具有并行效能。

根据整体结构的质量和刚度分布,将结构按楼层划分为子结构,并提前通过对上部结构做静力推覆得到楼层骨架曲线。通过将结构缩减为多自由度体系,可对整体结构模型进行较好地降阶。各子结构的质量凝聚于楼层质心,并将子结构刚度阵进行转换,利用并行计算对非线性数值子结构进行计算反演。降阶后的非线性多自由度模型,根据骨架曲线可采用武藤清模型(Takeda Model)^[19]或枢纽点模

型(Pivot Model)^[20]进行楼层非线性动力响应复现。

1.4 隔震层数值子结构的构成

隔震层的数值子结构可通过对隔震层元件(如:橡胶支座)的精细化拟静力分析数值模拟或取样本隔震元件进行拟静力试验得到相关试验参数,并对理论计算值进行修正。对于橡胶隔震支座采用考虑铅芯软化的Ramberg-Osgood本构模型^[21],通过拟静力精细化分析或拟静力试验,对Ramberg-Osgood本构模型进行参数识别,得到数值空间中隔震层支座的力学性能,并将隔震层各支座凝聚成为单个支座,与试验子空间的橡胶隔震支座并联,进而组合得到混合试验模型。

1.5 基于缩减自由度的非线性隔震混合试验

上述分析方法是考虑上部结构非线性影响的隔震结构混合试验方法。如图2所示,采用动静结合的模式,预先在静态空间中上部结构以楼层形式进行简化,并在静态数值空间中利用拟静力分析推覆得到各楼层的能力曲线;可通过拟静力试验或模拟预先对隔震元件的本构进行识别。在静态空间中整体隔震结构简化为非线性多质点模型,传递到混合试验模型中,作为混合试验的数值空间子结构,并与混合动力试验的隔震支座进行数据交互,实现隔震结构混合试验。

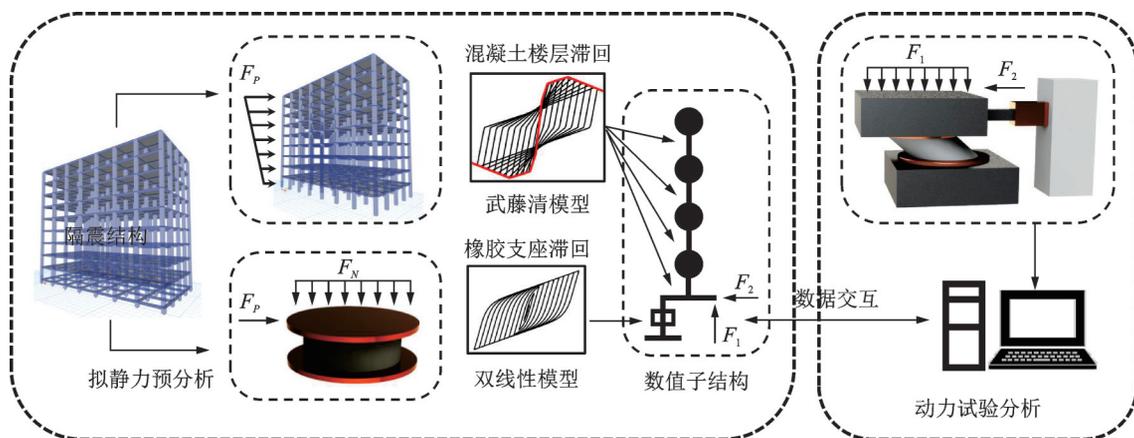


图2 隔震结构混合模拟示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mixed simulation of isolated structures

2 试验概况

2.1 分析模型概况

本试验模型采用10层隔震框架混凝土结构,如图3所示,层高为4 m,混凝土强度为C30。隔震层采用40个LRB1200的铅芯橡胶支座,将其中一个LRB1200支座作为混合试验的试验子结构,其他部

分在数值空间中作为数值子结构进行分析。

2.1.1 上部框架结构

该上部结构模型为某第四代核电堆型附属厂房,为10层 7×4 的混凝土框架结构,长跨为6.0 m,短跨为5.0 m,总宽度为20.0 m,总长度为42.0 m,总高度为40.0 m。框架柱尺寸均为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$,框架梁尺寸均为 $300 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 。楼板采用刚性假定,结构总质量为15486.3 t,结构阻尼比 ξ 为0.05。钢筋混凝土梁柱截面如图4所示。

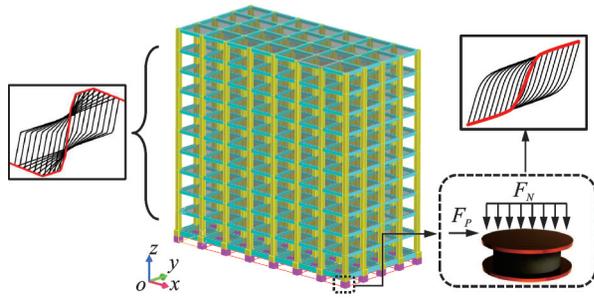


图 3 混合试验示意图

Fig. 3 Diagram of mixed test

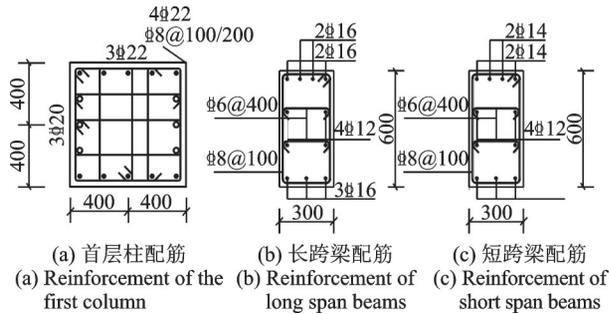


图 4 梁柱截面配筋信息(单位:mm)

Fig. 4 Beam-column section reinforcement information (Unit: mm)

2.1.2 隔震支座参数

该试验模型下部的隔震层采用 40 个 LRB1200 的橡胶隔震支座。其中,橡胶总厚度为 236 mm,第一形状系数为 41.96,第二形状系数为 5.09,该 LRB 1200 支座的具体构造参数如表 1 所示。

表 1 LRB1200 橡胶支座构造

Tab. 1 LRB1200 rubber bearing structure

参数	单位	数值
橡胶外径	mm	1220
铅芯直径	mm	220
橡胶部高度	mm	478
支座总高度	mm	560
1 次形状系数 S_1	—	41.96
2 次形状系数 S_2	—	5.09

2.1.3 地震波选取

本文拟设该建筑位于抗震设防烈度为 8 度的地区,设计基本地震加速度为 0.3g。本文选择天然波 El Centro 波、Taft 波,人工波 Artif1 波、Artif2 波,并根据核电 RG1.6 谱对地震波进行修正,将地震波作为输入地震动,加载幅值为 0.3g,如图 5 所示。各地震波反应谱与 RG1.6 反应谱对比如图 6 所示。

2.2 静力子结构分析

2.2.1 上部结构楼层推覆分析

根据上部结构各结构构件的尺寸,通过 Per-

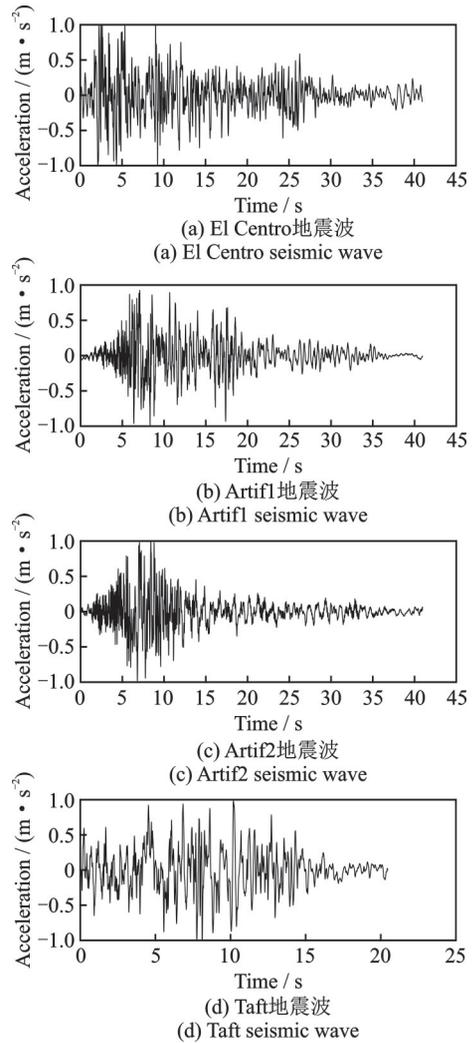


图 5 加载地震波

Fig. 5 Loaded seismic waves

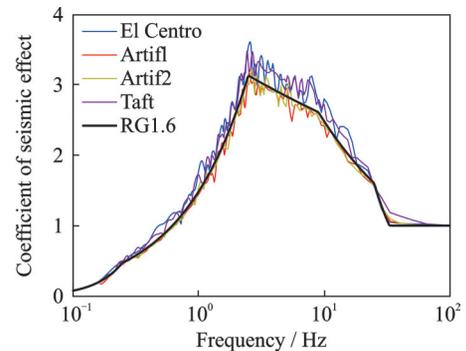


图 6 地震波反应谱对比

Fig. 6 Comparison of seismic wave reaction spectrum

form-3D 建立三维结构有限元模型,约束混凝土本构采用 Kent-Scott-Park 本构模型,钢筋选用 No-Buckling 模型。梁截面采用释放轴力的纤维截面,柱截面采用纤维截面,楼板采用刚性假定。考虑梁柱节点转动,从楼层上部至下部依次进行铰支座约束,并进行推覆分析和往复滞回分析。如图 7(a) 所示,当楼层处于弹性状态时,得到的各楼层刚度约为 1×10^6 kN/m,且随着楼层变高,由于重力影响减

弱,各柱的轴压比减小,使得更高的各楼层的极限承载力有所增加。

通过 MATLAB 将结构简化为 MDOF 剪切模型,基于 Perform-3D 得到楼层的能力曲线,采用武田模型(Takeda Model)得到各楼层的滞回本构。如图 7(b)所示,首层楼层采用 MDOF 剪切模型得到的能力曲线进行滞回模拟分析,基于 MDOF 剪切模型得到的滞回曲线与 Perform-3D 模型的楼层滞回本构基本吻合。

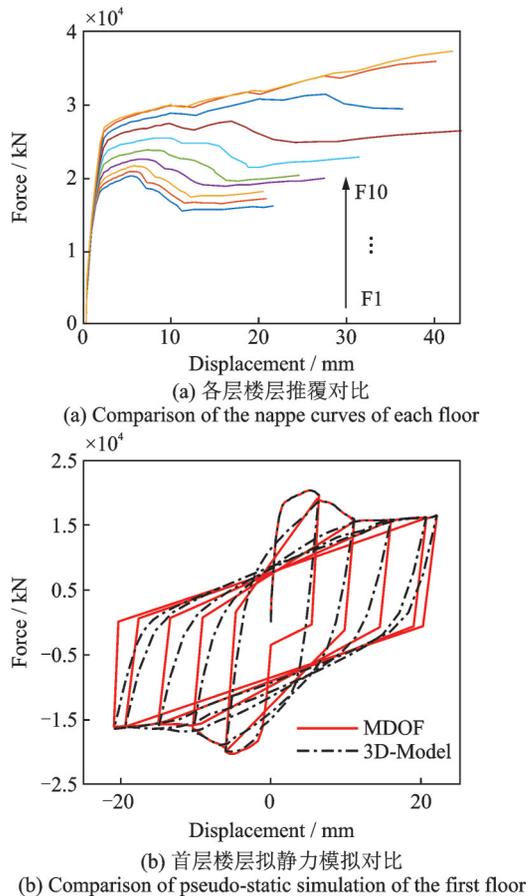


图 7 子结构的拟静力模拟验证
Fig. 7 Quasi-static simulation validation of substructures

2.2.2 铅芯橡胶支座拟静力分析

为得到 LRB1200 橡胶支座的力学性能,对该支座进行拟静力试验,采用三维结构模型得到的竖向轴力 4522 kN 进行竖向加载,水平加载工况为剪应变 $\pm 100\%$ 。

测试设备采用压剪试验机,竖向最大压力为 12000 kN,水平最大作动力为 2000 kN,水平最大行程为 ± 600 mm,最大加载频率为 0.05 Hz。

如表 2 所示,试验得到 LRB1200 橡胶支座的竖向刚度为 6787×10^3 kN/m,水平屈服后的刚度为 2.374 kN/mm,屈服力为 295 kN,等效阻尼比为 22.5%。由橡胶隔震支座刚度理论公式^[22]计算得到橡胶支座的竖向刚度为 6235.8×10^3 kN/m,水平屈

服后的刚度为 2.316 kN/mm,屈服力为 304.1 kN,等效阻尼比为 22.76%。通过理论公式计算得到的橡胶支座的各力学性能参数与试验测试得到的误差较小。将试验测试得到的 LRB1200 橡胶支座的各力学参数和修正 BRO 模型^[22]的恢复力模型特征,利用 MATLAB 对其数值模拟复现,如图 8 所示,吻合度较好。

表 2 LRB1200 橡胶支座静力试验测试
Tab. 2 Static test of LRB1200 rubber bearing

参数	理论计算	试验分析	误差/%
竖向刚度/(kN·mm ⁻¹)	6235.8	6787	8.12
水平屈服后刚度/(kN·mm ⁻¹)	2.3161	2.374	2.44
屈服力/kN	304.1	295	3.08
阻尼比/%($\gamma=100\%$)	22.76	22.5	1.16

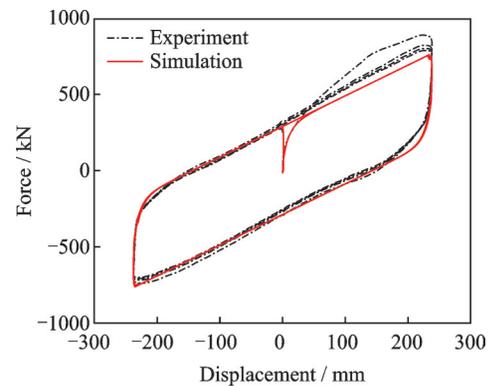


图 8 橡胶隔震支座拟静力试验对比

Fig. 8 Comparison of quasi-static test of rubber isolation bearings

2.2.3 结构组装

如 1.5 节所述,采用静动结合的模式,将 LRB1200 拟静力加载试验得到的参数作为数值子空间中单个隔震元件的参数,将 39 个该单元与上述 MDOF 模型作为混合试验模型中的数值空间子结构。该数值子结构与隔震支座试验子结构组成该混合试验模型,并对该混合试验模型进行混合试验与分析。

2.3 混合试验分析

将整个隔震结构模型中的一个 LRB1200 橡胶支座作为试验子结构,研究 1.5 节所述的混合试验方法对隔震结构在地震响应描述的有效性。

在该混合试验中,试验子结构为模型中柱下的 LRB1200 橡胶支座,由水平作动器提供水平力,顶部由竖向作动器和反力架施加竖向作用力,数值子结构为其余的 39 个 LRB1200 支座以及通过静力推覆得到的上部 MDOF 模型,由 MATLAB 进行数值模拟计算,且对数值子结构与试验子结构两部分进

行同步耦合计算。加载方案如图 9 所示,并将混合试验结果与 3D 模型数值模拟计算结果进行对比分析。

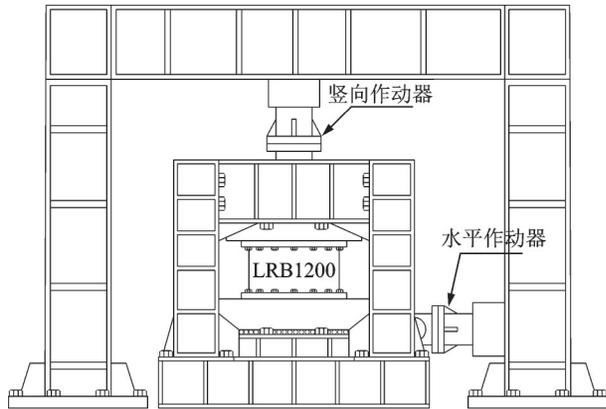


图 9 加载方案示意图

Fig. 9 Diagram of loading scheme

2.3.1 顶点位移/隔震层加速度时程分析

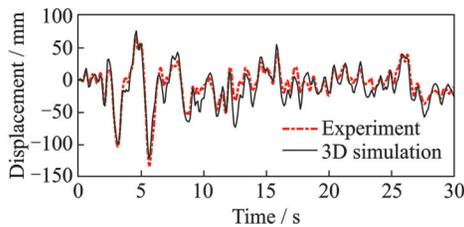
基于上述分析结果分别得到混合试验分析和 3D 模型数值模拟中的顶点位移及隔震层加速度峰值响应结果,如表 3 所示。在 0.3g 地震荷载输入下,混合试验和 3D 模型数值模拟结构的顶点位移峰值分别为 98.27 mm 和 94.40 mm,隔震层峰值加速度分别为 1.364 m/s²和 1.375 m/s²。

对上述结果进行对比分析如图 10 所示:混合试验分析和 3D 模型数值模拟得到的结构顶点和隔震层加速度时程响应基本吻合。

表 3 El Centro 波下结构响应峰值对比

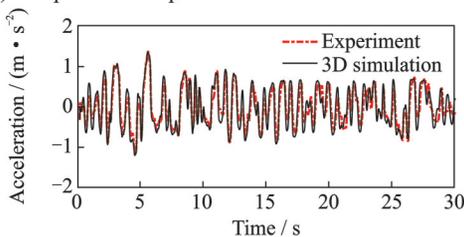
Tab. 3 Comparison of structural response peaks under El Centro wave

分析方法	顶点位移峰值/ mm	隔震层加速度峰值/ (m·s ⁻²)
混合试验值	98.27	1.364
3D 数值模拟值	94.40	1.375



(a) 结构顶点位移时程对比

(a) Comparison of displacement time histories of structure vertices



(b) 隔震层加速度时程对比

(b) Comparison of acceleration time histories of isolated layers

图 10 响应时程曲线对比

Fig. 10 Comparison of response time history curve

2.3.2 结构楼层动力特性分析

进一步分析了混合试验和 3D 模型数值模拟中橡胶隔震支座的滞回曲线对比,对比结果如图 11 所示。对 4 条地震波作用下的滞回曲线进行验证,可得出水平位移在 130 mm 以内,且混合试验采集得到的数据与模拟分析的基本吻合。由表 4 可得,在混合试验和 3D 模型数值模拟的对比分析中,等效刚度的误差在 6.47% 以内,阻尼比的误差在 7.24% 以内。

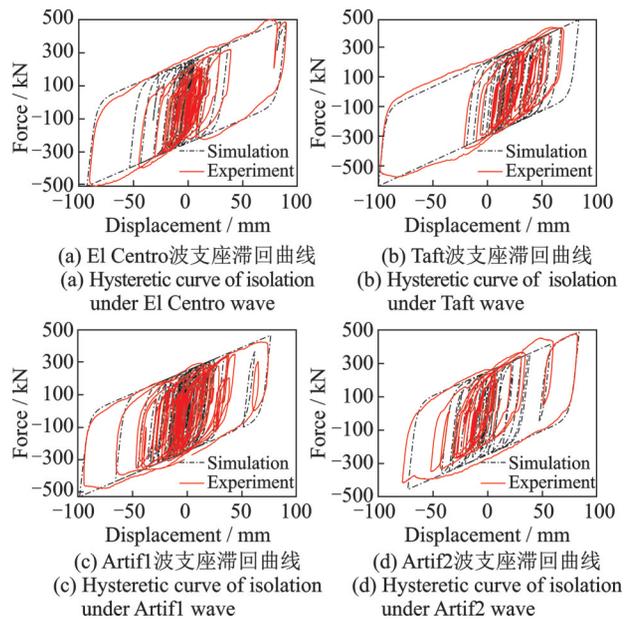


图 11 混合试验与三维结构模型滞回曲线对比

Fig. 11 Comparison of hysteretic curves between hybrid test and 3D structure model

表 4 混合试验与三维结构模型的等效刚度、阻尼比对比

Tab. 4 Comparison of equivalent stiffness and equivalent damping ratio between mixed test and 3D structure model

地震波	$K_{eff}/(kN \cdot mm^{-1})$		误差/ %	$\xi_{eff}/\%$		误差/ %
	模拟	试验		模拟	试验	
El Centro	5.689	5.415	5.06	26.72	27.28	2.05
Taft	5.148	5.504	6.47	25.82	24.08	7.24
Artif1	5.432	5.284	2.80	25.46	24.72	2.98
Artif2	6.022	5.809	3.67	25.10	25.64	2.12

加速度峰值响应对比如图 12 所示。图 12(a), (b)和(c)分别给出了混合试验、3D 模型数值模拟、多自由度质点系数值模拟的加速度峰值响应。在 0.3g 地震作用下,混合试验结构隔震层的平均加速度峰值响应为 1.34 m/s²,结构顶点加速度峰值响应为 0.76 m/s²;3D 模型数值模拟结构隔震层的平均加速度峰值响应为 1.322 m/s²,结构顶点加速度峰值响应为 0.79 m/s²;多自由度质点系数值模拟结构隔

震层的平均加速度峰值响应为 1.066 m/s^2 , 结构顶点加速度峰值响应为 0.81 m/s^2 。由图 12(d) 可得,

混合试验、多自由度质点系数值模拟、3D 模型数值模拟结果吻合。

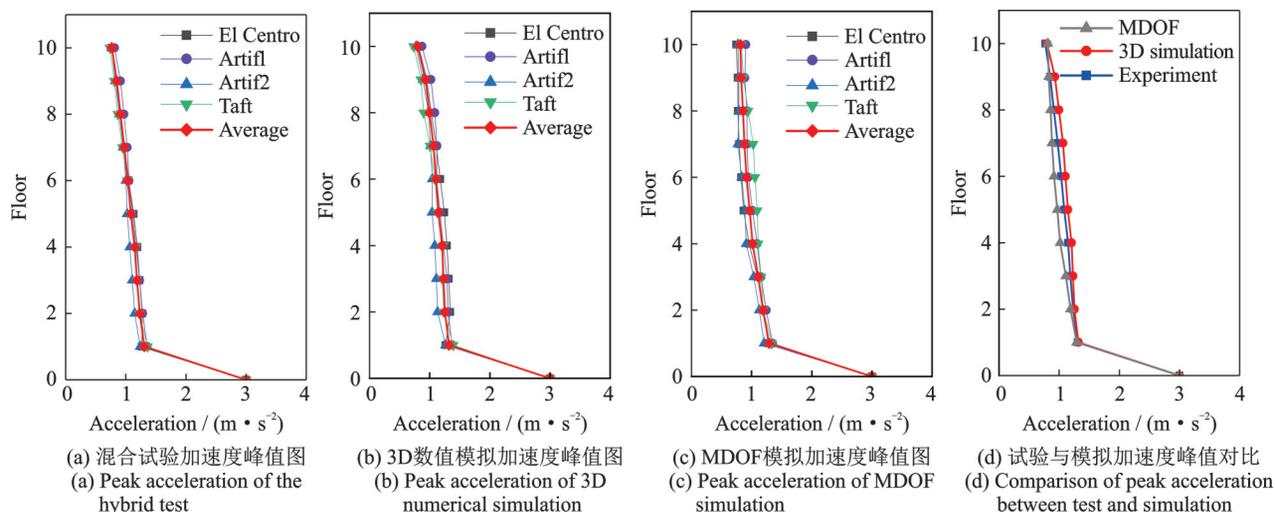


图 12 结构楼层加速度峰值响应

Fig. 12 Acceleration peak response of structural floor

3 结论

本文通过数值子结构自由度缩减的方法研究了 RC 隔震结构的混合试验, 该方法使得振动台对隔震结构尺寸约束的问题得以改善, 并且考虑到数值子结构中的非线性分析, 反映了隔震层橡胶隔震支座与上部结构耦合的真实响应特点。通过 10 层的隔震框架结构试验论证了该简化方法的可行性, 并可得到以下的结论:

(1) 通过对上部各楼层进行静力推覆得到骨架曲线, 并将各楼层的质量凝聚于楼层质点, 进而凝聚等效成为 MDOF 模型, 将该模型作为隔震结构的上部数值子结构, 可体现结构的非线性动力特性, 且该 MDOF 模型耦合试验橡胶隔震支座的混合试验模型可较好呈现整体隔震结构的动态响应。

(2) 数值子结构中的隔震元件在进行混合试验前通过对橡胶支座的拟静力试验预先校准, 校准后的数值隔震元件可提升混合试验的精度。

(3) 文中设计的分析方法实现和满足了分析要求, 混合试验模型得到的试验结果与三维模型数值模拟的计算结果比较吻合, 且保留了整体结构的非线性的复杂性。

针对隔震结构的混合试验方法, 本文所述的设计分析方法是有效的, 且不局限于具体的构造和具体参与工作的隔震元件, 故而在实际应用中仍需设

计试验者根据隔震元件所需进行调整。从本文中可得到, 隔震结构的混合试验分析模式总体而言是可行的。

参考文献:

- [1] 武唯一, 田石柱, 李双江. 基于 ABAQUS 与 OpenFresco 的结构抗震混合试验平台的研究[J]. 江苏建筑, 2016(4): 21-25.
Wu Weiyi, Tian Shizhu, Li Shuangjiang. Research on structure seismic hybrid test platform based on ABAQUS and OpenFresco [J]. Jiangsu Construction, 2016(4): 21-25.
- [2] 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. Progress in seismic test methods of structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 37(10): 19-27.
- [3] 蔡新江, 王彬, 田石柱. 高层建筑长周期地震反应子结构试验近似模拟方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(4): 536-542.
Cai Xinjiang, Wang Bin, Tian Shizhu. Approximate simulation method for long-period seismic response of tall buildings based on substructure test [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(4): 536-542.
- [4] Ahmadizadeh M, Mosqueda G, Reinhorn A M. Compensation of actuator delay and dynamics for real-time

- hybrid structural simulation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2008, 37(1): 21-42.
- [5] Chen C, Ricles J M. Improving the inverse compensation method for real-time hybrid simulation through a dual compensation scheme[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2009, 38(10): 1237-1255.
- [6] Shao Xiaoyun, Mueller Adam, Mohammed Bilal Ahmed. Real-time hybrid simulation with online model updating: methodology and implementation[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2016, 142(2): 04015074.
- [7] Sarebanha A, Schellenberg A H, Schoettler M J, et al. Real-time hybrid simulation of seismically isolated structures with full-scale bearings and large computational models[J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2019, 120(3): 693-717.
- [8] 谭晓晶,文龙,许国山,等. 6层装配式钢筋混凝土盒子结构的子结构拟动力试验与数值模拟分析[J]. *建筑结构*, 2020, 50(增刊1): 539-544.
Tan Xiaojing, Wen Long, XU Guoshan, et al. Pseudo-dynamic test and numerical simulation analysis of substructure of six-story prefabricated reinforced concrete box structure[J]. *Building Structure*, 2020, 50(Sup1): 539-544.
- [9] 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.
- [10] 李晓磊,谭平,姚洪灿,等. 高阻尼橡胶隔震结构实时混合试验仿真研究[J]. *广州建筑*, 2021, 49(2): 1-8.
Li Xiaolei, Tan Ping, Yao Hongcan, et al. Real time mixing test simulation of high damping rubber isolation structure [J]. *Guangzhou Architecture*, 2021, 49(2): 1-8.
- [11] 黄襄云,张磊,刘彦辉,等. 新型钢滚轴及混合隔震结构地震模拟振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(15): 74-81.
Huang Xiangyun, Zhang Lei, Liu Yanhui, et al. Shaking table tests for seismic isolation of structures with pure new type steel roller supports and those with combined supports[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(15): 74-81.
- [12] 王涛,潘鹏. 子结构混合试验方法研究与应用[J]. *工程力学*, 2018, 35(2): 1-12.
Wang Tao, Pan Peng. Research and application of substructure mixed test method [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(2): 1-12.
- [13] 彭天波,李翊鸣,吴意诚. 叠层天然橡胶支座抗震性能
的实时混合试验研究[J]. *工程力学*, 2018, 35(增刊1): 300-306.
- Peng Tianbo, Li Yiming, Wu Yicheng. Real-time mixed experimental study on seismic performance of laminated natural rubber bearings [J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(Sup1): 300-306.
- [14] Lin S C, Wang J X, Gao S, et al. Real-time hybrid test of a LNG storage tank with a variable curvature friction pendulum system [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2021, 21(3): 1-19.
- [15] Yang C Y, Cai X S, Dong G J, et al. Real-time hybrid simulation of a single-span girder bridge using a shake table coupled with an actuator [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, 25: 2544-2554.
- [16] Del Carpio R M, Hashemi M J, Mosqueda G, et al. Evaluation of integration methods for hybrid simulation of complex structural systems through collapse [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2017, 16(4): 745-759.
- [17] Chae Y, Phillips B, Ricles J M, et al. An enhanced hydraulic actuator control method for large-scale real-time hybrid simulations [C]. *Proceedings of Structures Congress 2013*, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. 2013: 2382-2393.
- [18] 李桂岩,李长文,向宁. 用 Matlab 进行 GPU 并行计算的问题及对策 [J]. *计算机与网络*, 2013, 39(11): 51-54.
Li Guiyan, Li Changwen, Xiang Ning. Matlab GPU parallel computing problems and countermeasures [J]. *Computer and Network*, 2013, 39(11): 51-54.
- [19] Morikawa Y, Umemura H. 23262 curvilinear hysteresis model for reinforced concrete structures: comparing with Takeda model [C]. *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*. Architectural Institute of Japan, 2014: 523-524.
- [20] Sharma A, Eligehausen R, Reddy G R. Pivot hysteresis model parameters for reinforced concrete columns, joints, and structures [J]. *ACI Structural Journal*, 2013, 110(2): 217-227.
- [21] James L A. Ramberg-Osgood strain-hardening characterization of an ASTM A302-B steel [J]. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 1995, 117(4): 341-345.
- [22] 日本建筑学会. 隔震结构设计 [M]. 刘文光,译. 北京: 地震出版社, 2006.
Architectural Society of Japan. *Seismic Isolation Structure Design* [M]. Liu Wenguang translated. Beijing: Seismological Press, 2006.

Research on RC isolated frame structures by coupling mixed test with reduced degree of freedom substructures

CHEN Mu-feng¹, LIU Wen-guang¹, CHU Meng², LI Shao-ping², PAN Peng³

(1.Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

2.Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Co., Ltd., Shanghai 200233, China;

3.Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In this paper, a hybrid experimental simulation method of isolation structure based on GPU parallel computing, reduced degree of freedom and considering nonlinear coupling mechanical properties of isolation bearings is proposed to accurately evaluate the real response characteristics of coupling between rubber isolation bearings and superstructure under seismic action. The restoring force performance of each floor of the superstructure is analyzed by numerical simulation, and the superstructure is simplified into a nonlinear MDOF shear model. Combined with the pseudo-static test of the isolation bearing, the isolation bearing model considering nonlinear coupling is established, and the reduced degree of freedom (DOF) substructure coupling mixed experimental numerical model of the structure is obtained. Through the dynamic test of the isolation bearing and the numerical interaction calculation of the substructure, the mixed simulation test of the RC isolation frame under different earthquake actions is carried out. The test results show that in the mixed test of 10-story RC isolation structure, the deformation of isolation layer is in good agreement with the numerical simulation results. The calculation results are in good agreement with numerical simulation, and the hybrid test method is used to analyze the structure of degree of freedom to shrink, which can better restore the upper structure dynamic characteristics and get the rubber isolation bearing the real response under seismic action, and to ensure the good analytical speed and precision.

Key words: isolated structure; mixed test analysis; statical analysis; reduction of freedom

作者简介: 陈睦锋(1994—),男,博士研究生。E-mail: jycmf@foxmail.com。

通讯作者: 刘文光(1968—),男,博士,教授。E-mail: liuwg@aliyun.com。