

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220822002

基于 OpenSees 的实时混合模拟试验技术的研究进展*

付忠余, 尹训强, 王桂萱

(大连大学建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

摘要: 实时混合模拟试验技术既可以控制实验成本与规模, 又可保证试验数据的准确性, 在工程地震中具有良好发展前景。其中, OpenSees 软件具有灵活高效、材料全面等优势, 被广泛作为实时混合模拟试验的数值子结构分析平台。首先, 探讨了实时混合模拟试验技术发展历程, 梳理了国内外发展重要时间节点; 其次, 对实时混合模拟理论基础, 即实时演算的迭代积分算法的分类与作用进行阐述说明; 然后, 探究以 OpenSees 软件为数值子结构模拟分析平台, 通过 OpenFresco 搭载 TCP/IP 协议实现数值子结构与物理子结构数据交互的混合模拟试验, 并依次介绍了国内外重要研究进展; 最后, 归纳了当前实时混合模拟试验在数值计算与伺服作动器加载方法中存在的问题, 并总结现有的实验精度补偿方法。

关键词: 实时混合模拟试验; 积分方法; 子结构; 有限元分析; OpenSees; OpenFresco

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1463-13

Research Progress of Real-time Hybrid Simulation Test Technology Based on OpenSees

FU Zhongyu, YIN Xunqiang, WANG Guixuan

(School of Civil Engineering and Architecture, Dalian University, Dalian 116622, China)

Abstract: Real-time hybrid simulation test technology can not only control the experiment cost and scale, but also ensure the accuracy of test data, which has a good development prospect in seismic engineering, among which, OpenSees software has the advantages of flexibility and efficiency, comprehensive materials and so on, and is widely used as a numerical substructure analysis platform for real-time hybrid simulation test. Firstly, the development history of real-time hybrid simulation test technology is discussed, and the important time nodes of development at home and abroad are sorted out. Secondly, the theoretical basis of real-time hybrid simulation, namely the classification and function of the iterative integration algorithm of real-time calculus are expounded. Then, this paper explores the use of OpenSees software as a numerical substructure simulation and analysis platform, realizes the hybrid simulation test of data interaction between numerical substructure and physical substructure by using OpenFresco with TCP/IP protocol, and introduces the important research progress at home and abroad. Finally, the problems existing in numerical calculation and loading method of servo actuator in current real-time hybrid simulation tests are summarized and the corresponding solutions are given.

* 收稿日期: 2022-08-22; 修回日期: 2022-11-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108437)、大连市青年科技之星项目(2020RQ057)资助

作者简介: 付忠余(1996—), 男, 研究生。主要从事抗震研究。E-mail: 1936661919@qq.com

通讯作者: 尹训强(1987—), 男, 副教授, 博士, 研究生导师。主要从事抗震研究。E-mail: yinxunqiang@dlu.edu.cn

Keywords: real-time hybrid simulation experiment; integration method; substructure; finite element analysis; OpenSees; OpenFresco

0 引言

由于我国地震带分布范围广泛并且人口众多,发生地震灾害的同时常伴随大量人员伤亡情况,因此我国也是受地震灾害影响最严重的国家之一。而防震减灾是结构设计中十分重要的一环,现代建筑隔震设计思路从早期的刚性抗震结构、发展到延性抗震结构,再到减震、隔震结构抗震,建筑结构的抗震能力逐步提高;而随着计算机在硬件性能与软件编译方面的发展,通过软件完成的数值模拟试验也逐渐成为一种重要又实用的分析方法,混合模拟试验的问世便是在数值分析方式与物理试验结合的基础上发展而来,混合模拟试验基于物理试验方式,精准处理有限元模型中难以模拟的非线性行为,而对于结构的线性部分直接通过有限元软件进行分析;将整体结构着重分析的关键构件作为实时混合模拟试验中的物理试验部分,其余部分作数值模拟,通过从整体拆分再合并的分析模式,实现对建筑结构抗震性能的综合评价。

1 实时混合模拟试验发展历程

理论推导(Theoretical derivation)、数值模拟(Numerical simulation)、实验室试验(Laboratory tests)作为研究土木工程问题的三种基本方法^[1],提供了土木工程研究的理论基础、计算分析与实例证明三方面的推断验证,实时混合模拟试验则巧妙地完成了对这三种土木工程基本研究方式的融合。

混合模拟试验最早起源自日本,该方法在拟动力实验的基础上提出,使用真实恢复力模型代替理论恢复力模型进行计算。上世纪70年代初,日本学者把结构动力方程中的阻尼力与惯性力参数输入数值模拟软件中计算,而结构的恢复力则采用试验方式确定,进而提出了一种全新的结构抗震分析方法,由于结构动力方程中的力学参数是采用两种截然不同的方式计算的,该方法便被命名为混合试验方法(hybrid experiment)^[2-3]。

上世纪80年代,混合模拟试验才真正被全世界

广泛接受,并且形成了从理论到试验都较为成熟的试验方法,K.Takanashi等^[4]为混合模拟试验创立了一种快速连续加载算法,通过将试模型拆分为物理子结构与数值子结构,将整体结构中难以使用计算机分析的非线性部分交付于物理试验处理,既保证数值模拟试验的准确性,同时物理试验在模型尺寸、规模限制、试验费用、加载自由度等诸多方面也能够得到更好保障。

日本学者M.Nakashima等^[5-6]率先提出了“实时混合模拟”的概念,通过采用与实际荷载作用时间相同的速率进行加载完成对试验构件的连续加载,由于加载信息是在毫秒内完成的,试验具有连续、即时的特点,故将此方法称为实时混合模拟试验(real-time hybrid simulation testing, RTHS)。

本世纪初,混合模拟试验方法在美国得到快速发展,2004年,美国国家科学基金委员会投入8200万美元成立地震工程网络模拟系统(Network for Earthquake Engineering Simulation, NEES),完成了对钢筋混凝土框架结构、钢结构、阻尼器等试验构件的动态响应分析^[7],验证了混合模拟试验在结构抗震性能、倒塌分析方面的可行性与准确性。

目前实时混合模拟试验依然处于初步发展阶段,国内外混合模拟试验通常采用计算机网络客户端/服务器网络(Client/Sever)和对等网络(peer-to-peer, P2P),通过网际协议、文件传输协议等控制有限元软件平台与各个试验站通讯,近年来OpenSees由于其在架构的灵活性与扩展性方面优势而被广泛使用。而在国内,王瑾等^[8]通过对比ANSYS与OpenSees软件地震模拟效果后发现,OpenSees软件平台具有自由度少、迭代速度快且容易收敛的优势,更符合混合模拟试验的要求。而随着实时混合模拟试验的发展,除了最开始采用OpenSees软件平台的混合模拟试验平台的单平台混合模拟试验,还出现了运用多个有限元分析平台处理数值子结构的多平台混合模拟试验,以及多站点网格化等研究方法。由中国自然科学基金委员会工程与材料科学部主办、湖南大学承办的远程协同网络化实验会议^[9]就是目前国内最早一批结构工程研究网络化实验项目。

2 实时混合模拟积分算法

实时混合模拟试验最重要特征之一就是实时性,这就要求试验模拟计算的每一步都要在以毫秒为单位的时间内完成,再通过对动力微分方程求解得出数值子结构分析结果,尤其在处理刚度较大的结构时,需要采用积分步长最小的数值积分方法,这就要求提出一种既稳定又精准的新型实时混合模拟试验积分方法。

混合模拟试验算法主要包括显式算法与隐式算法两类,前者为满足大刚度结构的小积分步长条件,在隐式无条件稳定算法的基础上创建的一系列无条件稳定的显式算法,显式算法的特点是全量加载,每一步加载位移只与上一步试验构件运动特性有关,且不需要反复迭代,计算速度快,唐玉等^[10]证明显式算法在线性系统与刚度软化特性非线性系统中无条件稳定性,较为经典的显式算法包括中央差分法^[11-12]、S.Y.Chang方法^[13]、 γ 方法等^[14]。而隐式积分算法是基于增量描述的迭代过程求解方程,与显式算法相区别的是隐式算法的每一步加载位移不仅与上一步试验构件运动特性有关,还与本步恢复力有关,因此隐式积分方法计算需要进行大量迭代,计算速度相应更慢,但隐式算法优点在于算法是无条件稳定的^[15],最具有代表性的隐式算法当属Newmark算法^[16],此外还包括OS方法和 α -OS方法等^[17],除上述的两种基本算法,还有将隐式迭代过程与加载控制循环有机结合的循环隐式迭代算法等。

实时混合模拟试验的积分算法最终可简化为第*i*步多自由度体系的离散运动方程:

$$M*\ddot{x}_i + C*\dot{x}_i + R_i + R_i^E = F_i \quad (1)$$

式中, M 表示质量矩阵; C 表示阻尼矩阵; R 表示恢复力向量; R^E 表示数值子结构与试验子结构交界处作用力向量; \ddot{x}_i 表示加速度; \dot{x}_i 表示速度向量; F_i 表示外荷载向量。

积分方法的确定是实时整个混合模拟系统的基础,试验的后续工作、研究方法都将紧紧围绕已选定的积分方法进行,数值子结构通过规定的积分方式完成力信号、位移信号计算,并将计算结果传送给试验子结构,试验子结构则将反馈的恢复力向量再次传输给运动方程,从而实现一步试验,之后不断重复上述过程完成实时混合模拟试验计算。

3 基于 OpenSees 的实时混合模拟试验

3.1 OpenSees 程序及其拓展应用混合模拟框架

3.1.1 OpenSees 程序混合模拟框架

实时混合模拟试验数值子结构是通过分析软件建立有限元数值模型,并完成模型计算与实时混合模拟试验流程模拟控制的混合模拟试验部分。

OpenSees 作为太平洋地震工程研究中心开发的一款开源软件,因其开源性而在结构抗震研究方面广受青睐;OpenSees 侧重于地震工程中非线性动力行为的仿真计算,不同于传统建模分析软件的线性处理方式,OpenSees 的特点在于模块化操作,以及面向对象的程序设计理念,将建模、结构方程集成、求解、数据处理可视化等划分为单独模块,采用面向单一分散对象的设计理念,可以使各个模块之间保持高度独立性,单个对象信息的更改不影响其他对象的表达,提高了软件分析的灵活性。OpenSees 作为数值子结构框架,优势在于其对框架结构、土结构系统等常规问题的地震分析提供了各种必要的元素和材料本构模型。

TCL 作为 OpenSees 的语言定义程序命令形式,采用代码形式直接建立模型,其本身不具备用户可视化功能(目前 OpenSees 用户可视化窗口主要包括陈学伟博士开发的 ETO^[18]、加拿大 UBC Tony Yang 教授开发的 OpenSees Navigator^[19]、清华大学陈莉教授团队开发的 Donap^[20]等),主要优势在于其强大的非线性构件计算能力,可以满足多种复杂算例的模拟。

OpenSees 数值子结构分析过程分为 4 个模块:建立模型模块(model builder),通过 TCL 语言定义节点、单元、约束条件;域模块(domain)储存需要进行分析的有限元模型的节点、单元以及荷载约束等信息;分析模块(analysis)获取域中储存的信息并进行有限元计算,该部分是数据处理的核心理,包含处理器、编号器、积分器等计算分析单元;记录模块(recorder)负责记录计算后的内力、位移以及变形等结果数据。通过 4 个模块对模型数据的处理,用户可以设计多种有限元模型的分析。

3.1.2 OpenSeesSP 复杂自由度构件运算

隔震系统的实时或近实时混合模拟可以更准确地捕捉隔震器的真实行为,为应对拥有数千个

复杂自由度的大型非线性结构,在 OpenSees 软件的基础上还拓展了具有各种材料模型、元素和解决方案算法对结构系统的非线性响应进行建模和分析的 OpenSeesSP。该软件设计用于并行计算的地震隔离结构以允许在高性能计算平台上进行可扩展的模拟。混合模拟中的测试速率取决于数值模型的计算时间和测试设施的可实现加载速率。由 A.Sarebanha 等^[21]完成的使用具有并行处理能力的 OpenSeesSP 计算抗震原型核试验 (ANT) 发电厂模型的混合模拟试验。其试验测试过程中保持分析求解器和实时数字信号处理器 (DSP) 之间的通信,保证其研发的地震反应修正装置 (SRMD) 轴承试验机与大型数值模型的高效数据交换,完成了对一维和二维激励进行实时或近实时混合测试,SRMD 系统的反馈跟踪技术主要通过结合使用自适应时间序列延迟补偿器和在执行器控制系统中使用前馈控制两种方式完成,虽然其垂直方向自由度跟踪性能尚无法满足实验要求,但对大型复杂结构的实时混合模拟仿真奠定了重要基础。

3.1.3 OpenSeesMP 多处理器同步运算

同为 OpenSees 拓展软件的 OpenSees MP 在参数分析方面有明显优势,可以同时执行数值模型的不同版本。基于 TCL 的顺序 OpenSees 解释器允许同时进行多个模拟,仅使用单个输入脚本组成不同的地面运动和所选参数的不同值,将顺序输入脚本转换为 OpenSees MP 中的并行版本所需的更改量最少。此外,OpenSees MP 可以并行处理状态确定和方程求解,但这需要更高级的命令。来自 K.M. Mosalam 等^[22]于第四届结构动力学和地震工程计算方法国际会议发表结果。采用 OpenSees MP 进行混合模拟试验运算可大大减少实验运行时间,其采用在地震工程模拟网络的网络基础设施 (NEE-Shub) 内的地震工程模拟网络 (NEES) 上运行 OpenSees MP 的方法完成对大量处理器的同时访问,NEES 集群的 8 个处理器运行 40 次地面运动持续时间为 536 s,而使用本地计算机上的单个处理器进行相同模拟需要 1 648 s,其计算效率提高三倍以上,大大缩短了试验时间。

3.2 OpenFresco 混合模拟平台

OpenFresco 平台由试验站点 (Experimental Site)、试验设置 (Experimental Setup)、试验控制

(Experimental Control) 三部分组成^[23]。Open Fresco 程序架构同为面向分散对象的设计方法,此种拥有高度独立性的方法可在不依赖于其他对象的情况下添加新的单元,删除旧的单元或是直接完成单元的修改,可以与任何提供应用程序编程接口 (API) 的有限元代码交互,并且 OpenFresco 支持多种试验端设备兼容,可连接 MTSCsi、LabVIEW、dSpace^[24-25]等多种试验加载控制设备,OpenFresco 是为混合仿真而开发的中间件系统,其核心思想是将试件 (物理子结构) 结合到整个结构系统的有限元模型中。

3.3 OpenFresco 连接协议

混合仿真中必不可少的两个子结构之间的数据交换是通过 TCP/IP 和 OpenFresco 中定义的四个抽象模块建立^[26],作为客户端程序架构具有较高模块化和灵活性特性,可以将信号的元素自由度转换为助动器的执行器自由度,进而由标准化的数据交换格式和通信协议启用,任何潜在的集成或子结构模块都可以通过该协议相互通信,此数据交换格式的设计包含各种仿真目的所需的信息,例如实时仿真、带热负载的混合仿真等。其原理如图 1 所示,上部为客户端程序,下部的四个部分类似于服务器程序。客户端和服务器使用几种可用的通信协议之一相互通信。图中的前两个配置说明了使用 TCP/IP 套接字符进行通信,后两者使用 NTCP 协议进行通信,使得实验设置转换发生在客户端或控制插件内部服务器端。借助 OpenFresco 的灵活性,可以在 NTCP 服务器上使用任何现有的控制插件 (例如 Matlab 插件、Labview 插件、Shore-Western 插件和 Fresco 插件等)。

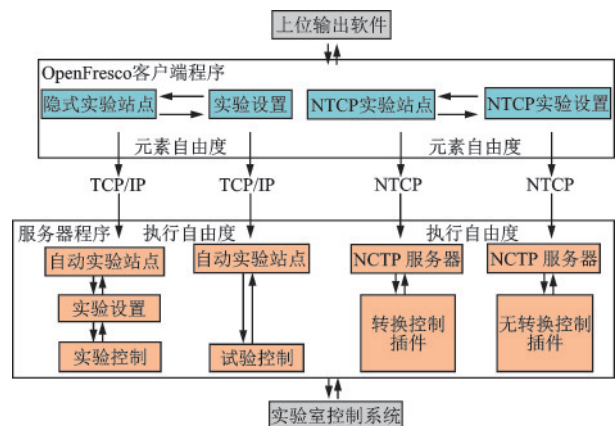


图 1 OpenFresco 通讯架构示意

Fig.1 OpenFresco communication architecture diagram

3.4 基于 OpenSees 实时混合模拟试验组成

实时混合模拟试验系统包括计算机(搭载混合模拟数值子结构)、总控制器、油管动力系统、油源控制器、伺服作动器、试件固定加载系统(例如大型压剪机、反力墙等)、传感器、电箱等组成^[27]。仪器连接示意图如图2所示。数值子结构采用搭载有限元分析软件的计算机进行分析,结构中线性相关的部分通过有限元软件模拟可以得到较为准确的计算结果,非线性部分则作为试验子结构进行物理试验,通过与计算机相连接的总控制器,控制伺服作动器动作,完成模拟地震荷载的加载过程,再通过与试件连接的传感器反馈构件受到的作用力、变形、位移等信息,将反馈信息传输回到计算机中,完成真实恢复力向量模型的设置,并为下一步恢复力向量计算提供依据。

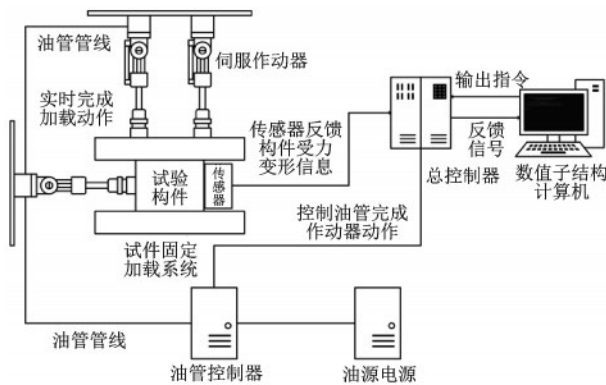


图2 实时混合模拟试验连接示意

Fig.2 Schematic diagram of RTHS test connection

实时混合模拟试验之所以可以做到实时反馈,是由于实验设备可以通过伺服作动器与传感器实时测得试验子结构的恢复力,试件受到荷载作用得到的恢复力模型再通过反馈线路传送至计算机中的数值子结构,进而为数值计算的下一步需要施加的荷载提供依据,其原理如图3所示。

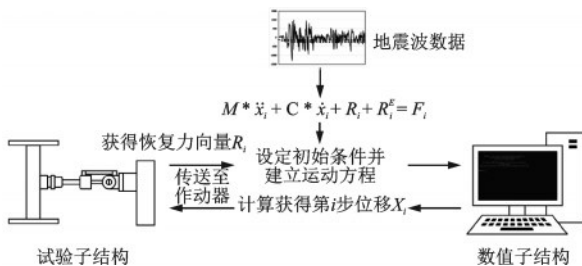


图3 实时混合模拟实验示意

Fig.3 Schematic diagram of RTHS experiment

目前的混合模拟试验常用分析软件有 OpenSees-OpenFresco 系统、OpenSees-FHT 系统、MATLAB/Simulink, 以及陈梦晖^[28]开发的 FSRTHT 系统等;由于 FHT 系统仅支持 OpenSees 软件平台集成且该系统目前只能实现较低加载速率的混合模拟试验,其使用率远不及 OpenFresco 系统,故由 OpenSees-OpenFresco 构成的混合模拟系统具有更高的操作性与灵活性。

数值子结构最关键的问题是如何在数值子结构中设置合理的求解以及试验参数,在以 OpenSees-OpenFresco 为基础的实时混合模拟系统中,数值子结构的有限元模型通过 OpenSees 软件计算,而 OpenFresco 则作为连接数值子结构与试验子结构的中介平台,实时输入加速度信号与接收试件反馈的力学信号^[29]。目前国内应用 OpenFresco 平台的抗震混合模拟试验最采用 OpenSees(有限元分析数值子结构系统)-OpenFresco(框架软件连接系统)-MTS(试验控制系统与数据采集系统及接口应用程序)三个系统完成实时混合模拟实验^[30]。该试验系统最大优势就是双子结构的搭建方便灵活,适应多种试验条件。试验框架如图4所示。

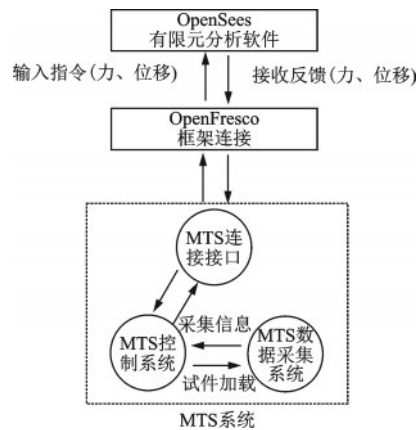


图4 MTS混合模拟试验示意

Fig.4 Schematic diagram of MTS hybrid simulation test

国内已有诸多学者基于 OpenSees 有限元分析软件与 OpenFresco 框架平台完成了相关的混合模拟试验的课题研究,王强等^[31]是最早在国内使用 OpenSees-OpenFresco-MTS Flextest GT 系统,验证 OpenFresco 框架软件足够胜任结构构件层次子结构动力试验的混合模拟试验,奠定了国内研究混合模拟试验的基础,何政等^[32]通过 OpenSees 软件完成了多平台混合模拟分析与多尺度一体化混合建模分析,对整体结构的不同数值子结构作有限元分析,验

证了 OpenSees 混合模拟试验在处理结构抗震问题上的优越性,确认了 OpenSees 在数值子结构方面的优势;袁小龙等^[33]基于 OpenSees-OpenFresco-MTS 系统对单层单跨钢框架结构进行混合模拟实验,以梁柱为数值子结构,斜撑型钢为试验子结构,验证了 OpenSees 与 OpenFresco 接口程序以及 MTS 试验控制系统之间优秀的通讯性能,并证明了基于 OpenSees 软件的实时混合模拟在分析钢框架结构时的可靠性。仅一年后,郭玉荣等^[34]基于 OpenSees 分析软件,采用软件模拟试验子结构滞回特性的方式,完成了虚拟子结构试验分析,其结果与整体结构时程分析结果一致;随着混合模拟框架拓展以及多实验站点远程同步技术出现,马磊等^[35]运用基于 OpenSees Navigator 可视化软件与 OpenFresco 网络通讯平台,远程控制异地实验室的 MTS 试验系统加载试验子结构,完成远程实验室的混合模拟试验。此外,杨澄宇等^[36]则基于 OpenFresco 平台,讨论了多种因素对混合模拟试验时长影响,不同积分算法、加载步长、地震动幅值等多方面的因素对试验耗时的影响。OpenSees 在结构抗震分析方面的优势,使得其成为混合模拟系统中数值子结构分析软件的首选,在进行混合模拟试验之前,为了保证真实试验的安全性与稳定性,需要使用 OpenSees 或其他有限元分析软件完成虚拟混合模拟实验,使用假定的恢复力模型代替试验构件真正的恢复力模型进行数值模拟计算,通过以上分析可知 OpenSees-OpenFresco-MTS 系统因其强大的兼容性与计算的稳定性,在国内已成为最主流的研究实时混合模拟试验的方法。

4 混合模拟试验分析前沿发展

由于国内的 RTHS 试验起步比国外晚,而目前国外的研究成果广泛,更具有代表性,当前 RTHS 发展正在不断趋于多元化复杂化,基于 OpenSees 的 RTHS 研究方向主要包含框架结构非线性构件混合模拟,地下结构的仿真分析,混合模拟热力分析,基于机器学习的混合模拟试验,多个数值分析软件结合分析等,由此可见,RTHS 技术正处于一个快速发展阶段,在不断向全新方面深度发展。

4.1 基于 OpenSees 框架结构混合模拟分析

目前框架结构研究为 RTHS 主要研究对象,国

内外研究成果已经颇多,下面介绍框架结构研究核心,由 T.Li 等^[37]基于高强度钢复合 Y 型偏心支撑框架(Y-HSS-EBFs)进一步研究实时混合模拟在大型空间框架结构中的适用性。通过 OpenSees、OpenFresco、xPC-Target 和电液伺服控制系统建立 RTHS,以三层 Y-HSS-EBF 的振动台试验模型为原型,并且将非线性性能最强的三层框架作为实验子结构,其余两层为数值子结构计算。通过与纯数值模型和振动台试验得到的结果进行比较,分析 RTHS 系统的稳定性。大量的框架结构 RTHS 试验结果表明,RTHS 结果与数值模拟结果吻合良好且与使用振动台获得的结果十分相似,在典型的抗震试验频率和子结构的质量分布范围内,RTHS 系统表现出良好的稳定性和可靠性,能够有效评估大型空间框架结构的抗震性能。该试验方法完全可以胜任简单框架结构的模拟计算。

4.2 地下结构的混合模拟仿真分析

H.Yu 等^[38]提出一种采用多轴实验装置对土壤结构系统进行地震分析的虚拟混合仿真(VHS)方法,并使用 OpenFresco 和 OpenSees 开发了相应的 VHS 框架,基于 OpenSees 设计数值模型,建立深 58 m,宽 200 m 的 Daikai 地铁站的数值子结构,Daikai 站的下部结构采用顶板与立柱刚性连接方式,将其设置为物理子结构,分别采用单自由度与三自由度加载方式分析地下结构框架试验结果^[39]。单自由度的控制点在试验构件切向;三自由度方案的控制点设置在柱模型的顶部,三个自由度方向分别为轴向,切向和旋转方向。其示意图如图 5~6 所示。

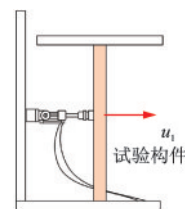


图5 单自由度方案

Fig.5 One DOF scheme

研究表明,VHS 方法在具有不同特征的地震激发下可提供真实地震响应。为证明计算效率,VHS 持续时间分别选取 4 090 s、23 000 s 和 30 000 s,通过将 VHS 响应与从数值计算获得的响应结果进行比较,验证地下结构的非线性响应。

该研究通过混合模拟试验方法准确有效地捕

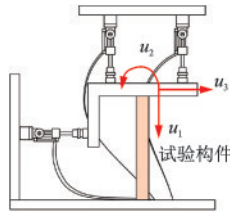


图6 三自由度方案

Fig.6 Three DOF scheme

捉地下结构的地震行为的能力。VHS框架中的扩展多轴设置为评估地下结构的系统级响应提供了一种可靠的方法,并有助于其他涉及加载设备和物理测试样本的混合模拟实验作为参考。

4.3 基于混合模拟系统的热力分析

M.A.Khan等^[40]将混合模拟试验应用于研究由局部高温引起的载荷重新分布问题,基于OpenFresco和OpenSees软件提出并成功实施了混合仿真(HS)方法,模拟冷结构对受火灾影响的结构元件提供的正确约束。通过研究三层楼高框架在热载荷和机械载荷下的行为,预测在热机械载荷下测试的复合梁的跨中挠度,依此验证OpenSees承载能力的混合模拟方法,最终将复合梁的HS分析与无约束或简单支撑的版本进行比较,得到试验的准确结果。该研究核心在于OpenSees Thermal中的“传热”模块可用于运行一维(1D)到三维(3D)传热分析,分析框架如图7所示。将建模对象(传热节点、元素和边界条件)存储在HeatTransfer Domain中并在HeatTransfer Analysis对象中执行计算。

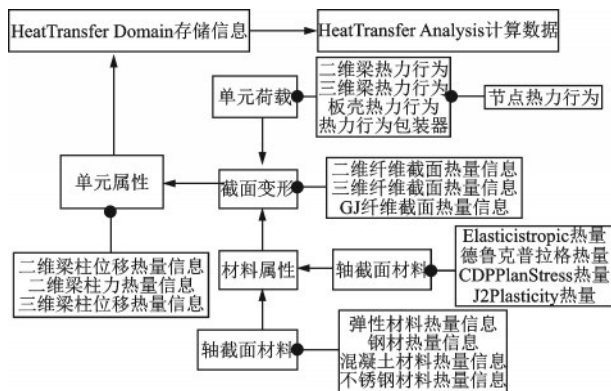


图7 OpenSees Thermal框架示意

Fig.7 Schematic diagram of OpenSees Thermal framework

基于OpenSees框架的兼容性与程序的灵活性,其已经扩展至3D环境中执行复合结构的热力学分析,并且完成对冷结构提供的约束的精确测量。该

方法发展方向集中在对3D结构的火灾暴露部分和2D结构的其余部分建模,对研究火灾暴露结构组件的局部屈曲行为具有重要参考价值。

4.4 基于机器学习的混合模拟系统开发

随着混合模拟技术的发展,一定会与其他学科产生学术交叉的研究方向,E.E.Bas等^[41]通过使用复杂机器学习模型(ML)代替有限元模型(FE),与从有限元模型获得的纯解析解进行比较,验证基于机器学习的混合模拟试验开发可能性。

该方法所有ML模型和系统评估,都选择单间、一层钢支撑框架。柱和梁定义为数值子结构,而支撑定义为RTHS测试的实验子结构。在Simulink中实现简化线性回归ML模型确立,并初步研究Python的ML算法在本地PC和集群上运行可行性,OpenFresco充当中间层服务器,Python作为客户端,通过打开UDP/TCP通道启动服务器,设置模拟应用站点。其示意图如图8所示。

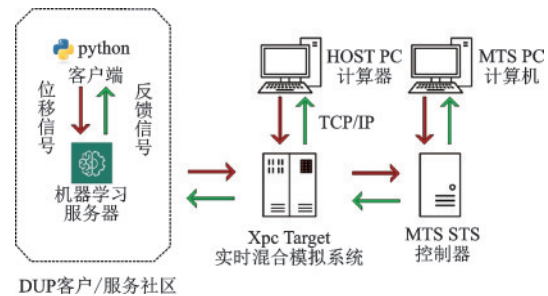


图8 ML混合模拟示意

Fig.8 Schematic diagram of ML hybrid simulation

这项研究的目的在于基于ML的计算子结构具有推进RTHS测试并帮助探索未来新研究领域的潜力。能过面对未来在分析模型变得更加复杂时,将RTHS扩展到更大工程问题时所面临的挑战。另一方面,使用机器学习技术解决不同学科的工程问题的思路不断发展,同样是结构工程的前瞻性方向。

4.5 基于OpenSees复合软件分析方法

单一有限元软件的分析必然有其局限性,而Z.D.Xu等^[42]采用基于Matlab-OpenSees组合编程的混合测试系统首次实现了三维黏弹性阻尼结构的混合试验并且在不同的振幅、频率和温度下测试黏弹性阻尼器的力学性能。

该方法以Matlab-OpenSees接口为通讯基础,

OpenSees 软件作为服务器, Matlab 软件作为客户端, 其中 OpenSees 基于 Tcl 语言提供集成通信模块, 调用该模块即可实现通讯功能; Matlab 通过调用 tcpip 函数可以建立一个基于 TCP/IP 网络协议的通信通道。而 Matlab 模块作为 OpenSees 模块与执行器系统之间的通信中介, 主要接收 OpenSees 模块的位移信号发送给执行器系统, 然后接收执行器系统传递的力信号发送给 OpenSees 模块。Matlab 与执行器系统之间的数据传输功能通过 Matlab 中 Instrument Control Toolbox 的串行通信功能实现。基于 OpenSees 和 Matlab 的通信模块, 可以编写 Matlab-OpenSees 接口, 实现 OpenSees 和 Matlab 之间建立通信并实时传输数据的功能。框架示意图如图 9 所示。

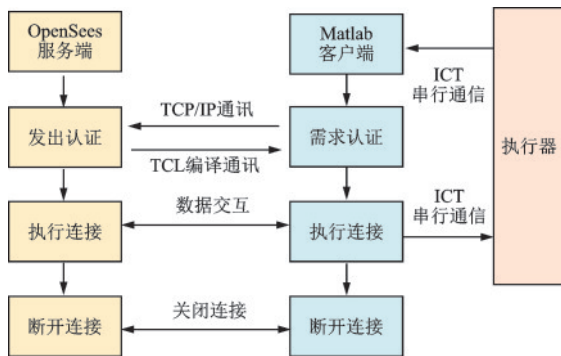


图 9 Matlab-OpenSees 框架示意

Fig.9 Schematic diagram of the Matlab-OpenSees framework

基于 Matlab-OpenSees 组合编程的新型混合测试系统的核心架构, 为其他类似混合测试系统的建立和实现提供了重要的参考价值。混合模拟试验与有限元数值模拟得到的三维黏弹性阻尼结构的动力响应结果吻合较好, 验证了基于 Matlab-OpenSees 组合编程的混合试验系统的准确性和鲁棒性。

A.Ghaffary 等^[43]通过 OpenSees 和 Abaqus 复合分析方法完成对单层大比例框架结构双 FE 程序耦合, 通过耦合两个 FE 程序和 TADAS 磁滞钢阻尼器设计混合模拟试验方案。

该复合软件分析系统通过 TCP/IP 连接将位移值发送到 OpenFresco 交互平台, 将分析配置和数据保存于耦合 FE 程序, 然后 OpenFresco 将这些位移信号发送到从属程序中的 Adapter 元素内, 并从 Adapter 程序接收力向量作为回报。Master 端的一个 Generic 超级元素和 Slave 端的一个 Adapter 元素

负责通过接口自由度在 Master、OpenFresco 和 Slave 之间进行数据交换。在 Abaqus 中作为虚拟实验室建立的 TADAS 子结构通过适配器元素接收来自 OpenSees Master 端的命令位移。OpenSees 模型通过计算界面自由度处的命令位移来开始分析, 通用单元的所有自由度都会收到同一组位移, 并从 Abaqus 端接收恢复力, 直到模拟结束。框架示意图如图 10 所示。

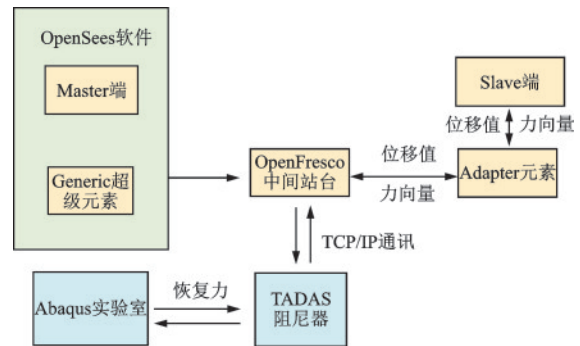


图 10 OpenSees Abaqus 框架示意

Fig.10 Schematic diagram of the OpenSees and Abaqus framework

复合软件的混合模拟试验将多个软件拆分成相互联系的模块区域, 各个模块之间单独处理某一部分复杂问题, 提高了试验效率, 发展潜力巨大, 但分析软件之间的通讯建立是复合软件试验的难点。此外使用阻尼器进行建模, 能够有效处理地震激发下对结构时滞行为带来的影响, 由此可见混合模拟试验阻尼器设置的准确性将会是影响实验结果的一个重要因素。

5 实时混合模拟试验的缺陷与补偿

5.1 实时混合模拟试验的缺陷

RTHS 试验研究方法虽然在试验成本, 试验可靠性等方面有诸多优势, 但是作为新兴试验方法, 目前尚存在许多缺陷。

首先, 根据是否利用有限元进行结构动力平衡方程求解^[44], 混合模拟系统区分为分离式与整体式, 对于分离式混合模拟系统, 结构的动力平衡方程基于质量集中法设计, 为了获取刚度矩阵与质量矩阵, 模型必须进行简化, 这也导致目前国内混合模拟试验研究方向主要是二维框架结构。

内华达大学雷内分校的紧凑型 HS 测试装置进

行一系列非线性 RTHS 测试。对于严重非线性模型的案例, RTHS 的性能和局限性, 主要是由于刚度和强度退化引起的。E.E.Bas 等^[45]提出了一种 RTHS 方法来研究使用支撑对旧钢抗弯框架 (MRF) 影响, 当同时考虑刚度和强度退化时, 由于不能满足单元力-变形相容性, 大多数显式算法都无法得出非线性分析, 导致分析失败。类似地, 算子拆分算法无法与这些模型和非线性行为类型一起使用。而隐式方法对实时分析的模型大小有限制要求。未来的 RTHS 需要开发稳健的集成算法或采用新的建模方法, 例如基于数据的模型或替代模型, 以在 RTHS 测试中包含具有刚度和强度退化的非线性模型。

由此得出结论, 评估测试结果的质量至关重要, 因为成功的 RTHS 测试, 其中支撑通过断裂和非线性框架行为进行测试, 并不一定意味着正确的结果, 特别是当实验错误影响物理子结构反馈时。在 RTHS 中考虑非线性模型可能对实验误差更敏感, 并强调为此类 RTHS 测试考虑功能强大的硬件的重要性。

对于实时混合模拟试验, 试验设备从指令发出到完成指定动作存在时滞现象, 这就导致计算机发出指令作用于试验子结构到试验构件运动特性传输回数值子结构之间有一定的时间差, 时滞问题作为影响实时混合模拟试验数据准确性的重要因素, 可等效为一个附加于结构的负阻尼^[46], 并且时滞问题属于系统误差, 在伺服作动器加载的过程中始终存在, 为减小这部分误差, 需要对伺服作动器加载过程进行一定的补偿。

5.2 实时混合模拟试验的补偿

5.2.1 试验时滞补偿

最简单的补偿时滞方式是将位移指令提前发送, 也称为位移预测, 通过位移预测使时滞延缓的时间与提前的时间相互抵消, 对于某一时刻 t 时刻, 预测出 $x(t+\tau)$ 的近似值, 再借由 x 的函数作为补偿后的位移指令, 但由于显式积分方式某时刻 t_i 之后的位移指令需要借由当下时刻的数据计算, 故该方法只适用于隐式积分方式, 无法适用于显式积分算法。

预测位移法则是时滞补偿最重要的方法, T.Horiuchi 等^[47]采用的 Lagrange 多项式外插除预测位移法, 通过已知的计算位移建立某一时刻 t_i 关于时间的多项式函数 $x(t_i)$, 再通过外插预测位移函数

$x(t_i + \tau_a)$ 达到对伺服作动器加载补偿的目的。M.I.Wallace 等^[48]使用的最小二乘法拟合固定系数多项式补偿法, 通过确定位移点的个数与多项式的阶数完成位移预测多项式建立; 而在预测位移法的基础之上产生了一种全新的补偿方法, 即逆补偿法^[49], 逆补偿法依赖离散传递函数计算, 通过将计算位移的离散替换为预测位移的离散完成时滞补偿, 由 C.Chen^[50]改进而来的二次逆补偿法, 则在此基础上再考虑实测位移与上一步计算位移, 从而减小时滞不准确带来的误差, 这种通过设置跟踪误差参数完成自主修正运动方程的方法, 也被称为自适应逆补偿法; J.E.Carrion 等^[51]采用在系统模型中加入质量矩阵与阻尼矩阵等初始条件并通过中心差分法预测位移, 提出了基于模型响应的位移预测时滞补偿方法; 除单一的补偿方式外, 还有采用集合几种方式整理出的集成理念综合补偿方法; 例如 P.C.Chen 等^[52]提出同时采用恢复力补偿方案与相位超前补偿法的双重补偿法, J.J.Ao 等^[53]通过频域测评指数 (frequency-domain evaluation index) 与自适应相位超前补偿器 (adaptive phase lead compensator) 削弱跟踪误差影响的组合式外环控制器法等^[54]。

除在作动器时滞方面寻求的补偿方法外, 还有采用新型作动器-振动台实时混合模拟试验方法^[55], 该方法从作动器动作的原理出发, 采用线性自然速度反馈与最小控制合成算法策略进行加载, 与传统方法相比有更好的加载控制精度且试验操作流程更易实现。

而在计算模型层面上, 基于模型补偿 (MBC) 方法, G.A.Fernandois 等^[56]采用实时反馈前馈控制器, 用于以笛卡尔坐标控制的多个执行器。通过移动平台的所有自由度, 推导执行器空间和笛卡尔空间之间的运动学变换。使用频域识别技术开发系统精确的传递函数。此法提供了更多可以使用混合模拟技术进行实验测试的结构类别的机会, 同时通过子结构方法显著改进了实验测试预算和时间安排。

对于作动器时滞受研究对象影响并非是一个常量, 而是与试验构件的刚度有关, 在加载过程中试验构件发生局部屈服, 导致刚度消耗从而使时滞减小, 相对于钢材而言混凝土结构的刚度变化更为明显, 在研究时若将时滞设为常数, 试验结果影响将十分明显。

5.2.2 自更新算法优化补偿

随着对 RTHS 的额外要求和递归系统识别技

术的最新进展,出现了通过从实验子结构中提取信息来提高保真度的思路。在线模型更新算法,即使类似于物理试样的部件的数值模型能够在试验过程中被相应地修改。在最近的研究中,模型更新已被集成到混合仿真中,通过在分析过程中更新数值模型来提高测试精度。主流的中间件工具(例如 OpenFresco 和 UI-SIMCOR)已扩展为支持伪动力混合仿真方法的在线模型更新平台。

最新的自更新算法诸如,G.Yang等^[57]扩展的名为 HyTest的平台,其基于有限元的识别模块使用实验测量方式在线识别材料本构参数。通过对钢框架上的实际混合测试验证了 HyTest在进行模型更新的混合仿真中的有效性。此外,G.Ou等^[58]将模型更新算法集成到 RTHS 中,将两个具有不同复杂程度的 Bouc-Wen 模型用作目标模型来验证试验思路并评估该方法的性能。试验选择约束无迹卡尔曼滤波器(CUKF)作为模型更新算法。RTHS 的准确性通过估计输出误差指标、模型更新输出误差指标和系统识别误差指标来评估。

实时混合仿真方法需要子结构之间的确定性数据交换计划,这要求采用硬调整实现。于是在原有子更新算法基础上,G.Abbiati等^[59]提出了分区时间集成算法来协调具有异构采样率的仿真和模型更新过程的并行执行过程,数值子结构和动态识别模型在同一仿真循环中进行评估,该仿真循环与控制系统的采样率同步,允许通过将混合仿真循环拆分为具有不同采样率的多个并行进程,进而利用多核 CPU 并行化处理。

结果表明,在适用的约束条件下,模型更新精度的敏感性受更新参数影响,通过将模型更新集成到 RTHS 中,可以在目标模型未知时提高全局响应精度。通过自更新算法优化补偿方式,验证非线性模型处理在线更新混合仿真的可行性。因此,模型参数对观察到的响应量的敏感性分析以及识别模型的降阶将推动我们在该领域的未来研究。

6 结 论

结合本文所述,实时混合试验技术是一种可行的测试方法,并且在研究广度与深度方向都具有良好的发展前景,而基于 OpenSees 平台的实时混合模拟试验具有以下结论:

(1) OpenSees 有限元分析平台在开源性与独

立模块设计方面具有优势,使其成为实时混合模拟试验数值子结构计算的首选;OpenFresco 中介平台软件具有良好的兼容性,可实现多种试验加载控制设备连接。

(2) OpenSeesSP、OpenSeesMP 在处理多自由度问题与多线程运行方面有显著优势,为并行运算的高性能计算平台提供了处理大型试验问题的可能。

(3) 基于机器学习的 RTHS 试验通过 ML 系统代替 FE 模拟,通过指令设置方便对于多自由度试件集中处理,其发展刚起步但实用性很强。

(4) 复合有限元软件的分组处理 RTHS 试验,其难点在于如何搭建合理的数值子结构分析平台,基于 TCL/IP、NTCP 等信号通讯,完成多个软件实时交互,其整体系统试验效率高于单个软件,发展潜力极大。

(5) 分析模型为获得合适刚度矩阵与质量矩阵需要进行简化,使得结构相对简单,目前 RTHS 的试验对象自由度多为 3 个,对于体量大、设计复杂工况的计算,RTHS 试验尚不可行。

(6) 模型更新在混合仿真中,通过在分析过程中更新数值模型来提高测试精度,对目标模型非线性行为全局响应精度提升尤其明显。

参考文献:

- [1] 赵宪忠,李秋云.土木工程结构试验量测技术研究进展与现状[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2017,49(1):48-55.
Zhao X Z, Li Q Y. A review on measurement technology for structural testing in civil engineering[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science), 2017, 49(1): 48-55. (in Chinese)
- [2] 李哲.考虑长周期地震动作用特性的拟静力试验加载制度研究[D].陕西:长安大学,2020.
Li Z. Study on quasi-static loading protocols considering the action characteristics of long-period ground motions [D]. Shaanxi: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [3] 杨世德,于德湖,王向英.拟动力试验在结构抗震领域的研究与应用[J].低温建筑技术,2021,43(8):49-53.
Yang S D, Yu D H, Wang X Y. Research and application of pseudo-dynamic test in field of structural seismic resistance [J]. Low Temperature Building Technology, 2021, 43 (8): 49-53. (in Chinese)
- [4] Takanashi K, Nakashima M. Japanese activities on

- on-line testing[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1987, 113(7): 1014-1032.
- [5] Nakashima M, Kato H, Takaoka E. Development of real-time pseudo-dynamic testing[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21(1): 79-92.
- [6] Nakashima M. Development, potential, and limitations of real-time online (pseudo-dynamic) testing[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, 359(1786): 1851-1867.
- [7] 李歆, 吕西林. 混合模拟试验技术在美国地震工程研究中的应用[J]. *结构工程师*, 2016, 32(6): 65-73.
Li X, Lyu X L. Hybrid simulation application in earthquake engineering research across NEES projects[J]. *Structural Engineer*, 2016, 32(6): 65-73. (in Chinese)
- [8] 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*, 2010(4): 108-111.
Wang J, Cai X J, Tian S Z. Numerical simulation on seismic behavior of CFRP retrofitted RC short column based on OpenSees[J]. *World Earthquake Engineering*, 2010(4): 108-111. (in Chinese)
- [9] 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 Y, Hu Q, Guo Y R, et al. A network platform for remote pseudo-dynamic testing[J]. *Journal of Building Structures*, 2005, 26(3): 122-129. (in Chinese)
- [10] 唐玉, 覃晖. 实时子结构试验中显式算法对比分析[J]. *工程力学*, 2020, 37(增1): 1-5, 12.
Tang Y, Qin H. Comparisons of model-based explicit integration algorithms in real-time substructure testing[J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(Sup1): 1-5, 12. (in Chinese)
- [11] Nakashima M. Part I: Relationship between integration time interval and response stability in pseudo dynamic testing[J]. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 1985, 353: 29-36.
- [12] 祝辉, 杨佑发. 结构拟动力实验数值积分方法的比较研究[J]. *实验科学与技术*, 2009, 7(3): 40-43.
Zhu H, Yang Y F. Comparative study on numerical integration algorithms for structural pseudo-dynamic test[J]. *Experimental Science and Technology*, 2009, 7(3): 40-43. (in Chinese)
- [13] Chang S Y. Explicit pseudo dynamic algorithm with unconditional stability[J]. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 2002, 128(9): 935-947.
- [14] Chang S Y. Improved numerical dissipation for explicit methods in pseudo dynamic tests[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997, 26(9): 917-929.
- [15] 赵忠华, 刘宪光, 王建新. 拟动力实验数值积分法的比较研究[J]. *建筑技术*, 2015, 46(增2): 132-134.
Zhao Z H, Liu X G, Wang J X. A Comparative study on numerical integration method for Quasi-Dynamic Experiments[J]. *Architecture Technology*, 2015, 46(Sup2): 132-134. (in Chinese)
- [16] Newmark N M. A Method of computation for structural dynamics[J]. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 1959, 85(1): 67-94.
- [17] Nakashima M, Kaminosono T, Ishida M, et al. Integration techniques for substructure pseudo-dynamic test[C]//*Proceedings of 4th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. CA: Palm Springs, 1990, 2: 515-524.
- [18] 陈学伟, 林哲. 结构弹塑性分析程序OpenSees原理与实例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014: 10-24.
Chen X W, Lin Z. Structural elastoplastic analysis program openses principle and example[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.: 10-24. (in Chinese)
- [19] Schellenberg A. OpenSees navigator & hibird Simulation[R]. Berkely: Project by Peer in Support of NEES, 2006.1-64.
- [20] 吴春. RC空间框架填充墙结构连续倒塌可视化模拟与安全性评定[D]. 哈尔滨工业大学, 2012: 17-25.
Wu C. Visualization simulation and safety assessment of continuous collapse of RC space frame infill wall structure[D]. Harbin Institute of Technology, 2012: 17-25. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] Mosalam K M, Liang X, Günay S, et al. Alternative integrators and parallel computing for efficient nonlinear response history analyses[C]//*4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPDYN)*. 2013: 12-14.
- [23] 张芬芬. 基于OpenSees和MTS的混合试验研究及应用[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.30-34.
Zhang F F. A study on application and hybrid testing based on OpenSEES and MTS[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2017.30-34. (in Chinese)

- [24] 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 G S, Hao W, Chen Y S, et al. Experimental validation on hybrid testing system based on Openfresco-labview-dspace[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(3): 417-423. (in Chinese)
- [25] 许国山,郝伟,陈永盛,等.基于有限元软件OpenSees和OpenFresco的混合试验[J].土木工程学报,2012(增1):36-41.
Xu G S, Hao W, Chen Y S, et al. Hybrid testing based on finite element software OpenSees and OpenFresco[J]. Journal of Civil Engineering, 2012(Sup1): 36-41. (in Chinese)
- [26] Schellenberg A, Mahin S A, Fenves G L. Application of an experimental software framework for international hybrid simulation[J]. Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Engineering, Taipei, China, 2006.
- [27] 许国山,郝伟,陈永盛,等.基于有限元软件OpenSees的混合试验系统及试验验证[J].振动与冲击,2012,31(22):45-52.
Xu G S, Hao W, Chen Y S, et al. A hybrid testing system based on finite element software OpenSEES [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(22): 45-52. (in Chinese)
- [28] 陈梦晖.实时混合模拟试验方法研究与软件开发[D].南京:东南大学,2018.
Chen M H. Method research and software development of real time hybrid simulation test[D].Nanjing: South-east University, 2018. (in Chinese)
- [29] 蔡雪松,杨澄宇,李衍熹,等.OpenFresco平台混合试验研究与应用[J].地震工程与工程振动,2019,39(3):185-194.
Cai X S, Yang C Y, Li Y X, et al. Research and application of OpenFresco platform in hybrid simulation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(3):185-194. (in Chinese)
- [30] 贾红星,蔡新江,田石柱.应用OpenFresco平台的抗震混合试验技术[J].四川建筑科学研究,2013,39(4):209-212.
Jia H X, Cai X J, Tian S Z. Hybrid simulation testing technology with OpenFresco framework [J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(4):209-212. (in Chinese)
- [31] 王强,冯帆,You Shawn,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 Q, Feng F, 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. (in Chinese)
- [32] 何政,蒋碧聪.OpenSees混合模拟试验技术发展与应用[J].力学进展,2012,42(6):804-820.
He Z, Jiang B C. Development and applications of hybrid simulation and experimentation using OpenSees[J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(6):804-820. (in Chinese)
- [33] 袁小龙,韩晓健.基于OpenSees的混合试验方法[J].混凝土与水泥制品,2014,4(10):72-75.
Yuan X L, Han X J. Mixed test method based on OpenSees [J]. China Concrete and Cement Products, 2014,4(10): 72-75. (in Chinese)
- [34] 郭玉荣,刘钟真.基于OpenSees的子结构拟动力试验方法研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(9):1-7.
Guo Y R, Liu Z Z. Research on substructure pseudo-dynamic test method based on OpenSees[J]. Journal of Hunan University (Natural Science), 2015,42(9): 1-7. (in Chinese)
- [35] 马磊,隋龔,强一,等.基于MTS加载系统及OpenFresco网络平台的远程协同子结构拟动力试验方法研究[J].地震工程与工程振动,2018,38(2):115-120.
Ma L, Sui G, Qiang Y, et al. The remote collaborative substructure pseudo dynamic test method research based on MTS load system and OpenFresco test platform [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamic, 2018, 38(2):115-120. (in Chinese)
- [36] 杨澄宇,蔡雪松,马原驰,等.基于OpenFresco平台混合试验时长研究[J].工程科学与技术,2020,52(4):124-131.
Yang C Y, Cai X S, Ma Y C, et al. Study on test duration of hybrid simulation based on OpenFresco platform [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(4): 124-131. (in Chinese)
- [37] Li T, Su M, Sui Y, et al. Real-time hybrid simulation of a space substructure based on high-strength steel composite Y-eccentrically braced frames[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(8): e2771.
- [38] Yu H, Li Y, Shao X, et al. Virtual hybrid simulation method for underground structures subjected to seismic loadings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110: 103831.
- [39] 许国山,陈琦,朱思宇,等.三自由度加载系统力-位移混合控制方法[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(4):586-595.
Xu G S, Chen Q, Zhu S Y, et al. Force-displacement

- mixed control method for 3-DOFs loading system [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2018, 34(4): 586-595.
- [40] Khan M A, Jiang L, Cashell K A, et al. Analysis of restrained composite beams exposed to fire using a hybrid simulation approach [J]. Engineering Structures, 2018, 172: 956-966.
- [41] Bas E E, Moustafa M A. Communication development and verification for python-based machine learning models for real-time hybrid simulation [J]. Frontiers in Built Environment, 2020, 6: 574965.
- [42] Xu Z D, Dong Y R, Chen S, et al. Development of hybrid test system for three-dimensional viscoelastic damping frame structures based on Matlab-OpenSees combined programming [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 144: 106681.
- [43] Ghaffary A, Karami Mohammadi R. Framework for virtual hybrid simulation of TADAS frames using openses and abaqus [J]. Journal of Vibration and Control, 2018, 24(11): 2165-2179.
- [44] 苏丹, 闫维明, 陈适才. 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 [J]. 世界地震工程, 2017, 33(1): 10-17.
Su D, Yan W M, Chen S C. Two realization methods of hybrid simulation test based on general finite element software and their analyses [J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(1): 10-17. (in Chinese)
- [45] Bas E E, Moustafa M A. Performance and limitations of real-time hybrid simulation with nonlinear computational substructures [J]. Experimental Techniques, 2020, 44(6): 715-734.
- [46] 章红梅, 曾松, 段元锋, 等. 实时混合试验方法研究与应用综述 [J]. 结构工程师, 2015, 31(1): 207-213.
Zhang H M, Zeng S, Duan Y F, et al. Overview of real-time hybrid simulation with substructure [J]. Structural Engineer, 2015, 31(1): 207-213. (in Chinese)
- [47] Horiuchi T, Inoue M, Konno T, et al. Real-time hybrid experimental system with actuator delay compensation and its application to a piping system with energy absorber [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2014, 43(9): 1361-1380.
- [48] Wallace M I, Wagg D J, Neild S A. An adaptive polynomial based forward prediction algorithm for multi-actuator real-time dynamic substructuring [J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2005, 461(2064): 3807-3826.
- [49] Chen C. Development and numerical simulation of hybrid effective force testing method [D]. Department of Civil and Environmental Engineering, Lehigh University, Bethlehem, PA, 2007.
- [50] Chen C, Riccio J M. Improving inverse compensation method for real-time hybrid simulation through a dual compensation scheme [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2009, 38(10): 1237-1255.
- [51] Carrion J E, Spencer Jr B F. Real-time hybrid testing using model-based delay compensation [J]. Smart structures and systems, 2008, 4(6): 809-828.
- [52] Chen P C, Tsai K C. Dual compensation strategy for real-time hybrid testing [J]. Earthquake & Structural Dynamics, 2013, 42(1): 1-23.
- [53] Ao J J, Mercan O. A study on a benchmark control problem for real-time hybrid simulation with a tracking error-based adaptive compensator combined with a supplementary proportional-integral-derivative controller [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 134: 106346.
- [54] 刘洪波, 刘洁. 建筑抗震实时混合试验时滞补偿方法研究综述 [J]. 地震工程学报, 2020, 42(6): 1361-1368.
Liu H B, Liu J. Review of delay compensation method of real-time hybrid testing of earthquake resistance of buildings [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2020, 42(6): 1361-1368. (in Chinese)
- [55] 石阿明. 作动器-振动台实时混合试验方法数值研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
Shi A M. Numerical study on real-time hybrid testing method using actuator-shaking table [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [56] Fernando G A, Spencer B F. Model-based framework for multi-axial real-time hybrid simulation testing [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2017, 16(4): 671-691.
- [57] Yang G, Wu B, Ou G, et al. HyTest: platform for structural hybrid simulations with finite element model updating [J]. Advances in Engineering Software, 2017, 112: 200-210.
- [58] Ou G, Dyke S J, Prakash A. Real time hybrid simulation with online model updating: An analysis of accuracy [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 84: 223-240.
- [59] Abbiati G, Lanese I, Eftekhari Azam S, et al. A framework for hybrid simulation with online model updating suitable for hard real-time computing [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(1): e2652.

(本文编辑: 周小潭)