文章编号:1674-2974(2017)03-0068-08

子结构拟动力试验边界条件模拟方法*

郭玉荣1,27,黄强1

(1. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;

2. 湖南大学 建筑安全与节能教育部重点实验室,湖南长沙 410082)

摘 要:针对框架结构体系研究了基于有限元软件 OpenSEES 的子结构拟动力试验方法.以单层单跨钢框架为例进行了3种不同边界条件模拟方案下的子结构拟动力试验,其中 严格边界条件下的试验结果与整体结构时程分析结果完全吻合,表明了该方法的正确性.在 此基础上,针对单层、5 层与8 层 3 个四跨钢筋混凝土框架,采用杆系模型进行3 种不同边 界条件模拟方案下的子结构拟动力试验.试验结果表明,仅考虑水平位移边界条件时对试验 子结构柱的滞回曲线模拟误差较大,同时考虑水平位移与转角边界条件则能很好地模拟试 验子结构柱的滞回曲线.各种简化边界条件对基底剪力影响较小,而对底层水平位移的影响 则基本可以忽略.研究结果可以为子结构拟动力试验方案设计提供参考.

关键词:子结构拟动力试验;抗震性能;边界条件;OpenSEES 中图分类号:TU317 文献标志码:A

Boundary Condition Simulation Method of Substructure Pseudo-dynamic Test

GUO Yurong^{1,2†}, HUANG Qiang¹

 College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082 , China; 2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the finite element analysis software OpenSEES, substructure pseudo-dynamic test (PDT) method for frame structures was investigated. Substructure PDTs of a one-story one-bay steel frame was conducted, in which three different kinds of boundary conditions were simulated. The correctness of the PDT method was demonstrated by the agreement between the test results with complete boundary condition and time history analysis results. For one-story, five-story, and eight-story four-bay reinforced concrete frames, substructure PDTs were also conducted with three different kinds of boundary conditions. The considerable discrepancy between the test and simulation results occurs in hysteresis curve of substructure columns when only horizontal displacement boundary condition was simulated. The simulation accuracy of the hysteresis curve of substructure columns can be improved when both the horizontal displacement and rotation boundary conditions are considered. The base shear was much less affected by u-

* 收稿日期:2016-03-22

作者简介:郭玉荣(1970-),男,浙江青田人,湖南大学教授,工学博士

基金项目:国家自然科学基金资助项目(91315301,51468010), National Natural Science Foundation of China (91315301,51468010); 国家自然科学基金重大国际合作项目(51161120360), Funds for Major International Cooperation of the National Natural Science Foundation of China(51161120360)

[†]通讯联系人, E-mail: yurongguo@hnu.edu.cn

sing simplified boundary condition, while its effect on first story drift can be ignored. The results can be used for the design of substructure pseudo-dynamic tests.

Key words: substructure pseudo dynamic test; seismic performance; boundary conditions; OpenSEES

拟动力试验方法由日本学者 M. Hakuno 等^[1] 首先提出,是研究结构体系地震响应常用试验方法 之一,但由于试验条件限制,往往难以进行大比例整 体结构的试验.考虑到在地震作用过程中,往往是结 构中比较薄弱的部分发生破坏,而其他部分则完好 或轻微破坏,20世纪 80年代末 90年代初,人们提 出植入子结构技术后发展成为子结构拟动力试验方 法^[2],可以解决试验设备和场地限制的问题.该方法 将复杂结构分为2部分,将在地震作用下容易损坏 的强非线性部分结构进行试验,称作试验子结构;而 其余部分由有限元软件计算模拟,称为数值子结构. 通过求解结构运动控制方程,在每一步对2类子结 构进行加载模拟,来完成拟动力试验.这样一方面解 决了结构中强非线性部分模拟困难的问题,另一方 面减小试验规模,降低了对试验设备的要求^[3-5].

目前子结构拟动力试验中,常常将整体结构简 化为层剪切模型,从而试验子结构的边界条件只需 要考虑水平位移和固定的竖向力.如李玉顺等[6]对 一榀3层单跨钢框架结构进行了研究,采用层剪切 模型,以一层为试验子结构,二、三层为数值子结构 进行了子结构拟动力试验;范云蕾等[7]针对多层剪 切型房屋结构模型开发了远程协同拟动力试验程序 NetSLab-MDOF,并应用于测试 10 层钢管混凝土 组合框架结构.层剪切模型仅对于某类特定结构如 强梁弱柱型框架较适用,应用于其他结构会产生较 大误差.因此,一些学者采用杆系模型模拟试验对 象,如杨格等^[8]开发了基于 OpenSEES 和 MTS 试 验设备的建筑结构混合试验软件 HyTest,并对一 个 6 自由度的单层单跨钢框架进行了子结构拟动力 试验;黄民元等^[9]开发了远程协同拟动力试验平台 NetSlabOSR.

当采用杆系模型时,试验子结构与数值子结构 间的边界条件模拟相对比较复杂.但实际情况下,由 于作动器数量有限,常常采用简化子结构边界条件, 如蔡新江等^[10]建立了 MTS-OpenFresco-MAT-LAB 混合试验系统,并对试验子结构柱采用定轴力 下加载水平位移的边界条件.王向英等^[11]对 3 层框 架结合地震模拟振动台进行子结构拟动力试验,采 用"自平衡装置"来实现试验子结构柱的竖向荷载与 水平位移的模拟.贾红星等^[12]研究基于 OpenFresco 的验证抗震混合试验,利用四连杆试验加载系统 对试验子结构柱采用力-位移混合控制方法进行了 混合试验.

子结构拟动力试验的出发点是将数值模拟不准确的部分从整体结构中取出来作为试验子结构,采 用试验设备进行真实试验加载,从而比较准确地模 拟其非线性滞回特征.但是试验子结构的加载边界 条件对其滞回性能有明显影响.由于试验子结构在 整体结构中所占的比例与整体结构的地震响应影响 明显相关,对一个构件数量较多的结构,取少量构件 为试验子结构的试验结果和全结构数值模拟结果的 差异很小,从而会大大降低子结构拟动力试验的 意义.

目前对子结构边界条件模拟问题,以及简化边 界条件模拟导致的试验误差及分析所进行的研究还 较少.本文首先利用有限元软件 OpenSEES 实现子 结构拟动力试验,然后针对框架结构取一个柱子为 试验子结构,对不同的边界条件模拟结果进行了对 比讨论.由于子结构占比较小,各种边界条件模拟下 的具体误差数值的意义有限,但可供将来设计子结 构拟动力试验方案时参考.

1 基于 OpenSEES 的子结构拟动力试验方法

1.1 子结构拟动力试验方法基本原理

子结构拟动力试验将子结构技术与拟动力试验 结合起来,除了具有拟动力试验的优势外,还通过子 结构技术,将整体结构分成试验子结构与数值子结 构,将在地震作用下易损坏的强非线性部分结构进 行试验,称为试验子结构;而结构其余部分由有限元 软件计算模拟,称为数值子结构.通过子结构之间数 据的协调反馈,综合起来实现整体结构的求解.子结 构拟动力试验的一般流程如图1所示^[13].

1.2 子结构拟动力试验方法在 OpenSEES 中的实现

本文利用非线性有限元分析软件 OpenSEES

的开源性及强大的非线性分析能力,对 OpenSEES 进行了二次开发来实现子结构拟动力试验.基于 OpenSEES的子结构拟动力试验方法如图 2 所示. 计算中心负责整体结构建模、运动方程求解和数值 子结构非线性模拟,这些工作均在 OpenSEES 中进 行.在每个试验步,计算中心提取所有试验子结构的 加载指令,通过本地通讯发送给控制中心,控制中心 再将加载指令分发到各个本地或远程实验室进行子 结构的加载.控制中心接收到各个实验室的子结构 反馈值后,再发给计算中心,进行下一步运动方程的 求解.



南1 丁结构扱効力低短流准因 Fig. 1 Flow chart of substructure pseudo-dynamic test

在研究子结构边界条件模拟时,以用 OpenS-EES 计算的全结构时程分析结果为参考值.由于采 用真实试验设备对试验子结构进行加载得到的结果 和参考值之间没有可比性,因此采用 OpenSEES 来 模拟试验子结构的加载和响应.模拟试验子结构的 OpenSEES 可以和计算中心的 OpenSEES 运行在 同一台计算机上.进行子结构拟动力试验时,需要 2 个模型的 Tcl 文件,一个是计算中心所需要的整体 结构模型文件,另一个是试验子结构 Tcl 文件,即利 用 OpenSEES 进行试验子结构的模拟.



图 2 基于 OpenSEES 的子结构拟动力试验系统 Fig. 2 Substructure pseudo-dynamic test system based on OpenSEES

在模拟试验子结构各种边界条件时,存在 OpenSEES只能实现节点位移边界条件一个方向上 的位移加载控制的问题.为此试验子结构加载模拟 时,水平自由度以位移加载控制,而竖向及转动自由 度通过读取整体结构在每个试验步计算的节点力, 采用力加载控制.通过 Tcl 语言的 for 循环命令来 实现子结构拟动力试验步内边界条件的修改:

for { set i 1 } { \$ i <= Nsteps { incr i} {.....

analyze 1 \$Dt

•••••• }

该命令中,在 for 循环体内,省略号部分表示具体的模型修改命令,如力边界条件、位移边界条件等.然后利用 analyze 命令实现分析,这样就实现了每步分析的模型修改.

在子结构拟动力试验过程中,需要实现计算中 心的 OpenSEES 和控制中心,或者和模拟试验子结 构的 OpenSEES 之间的通讯. OpenSEES 自身不提 供网络通讯功能,所以在编写代码时通过利用 Tcl 语言自带的通讯模块,直接在建模中调用. 通讯功能 是以套接字模式来实现的,具体命令如下: socket-server command port

该命令表示打开一个网络套接字并且返回一个 通道描述符.这个套接字描述符并不能用于输入输 出,而只能用于监听来自客户端的请求.当接收来自 客户端的请求并建立连接后,该命令就会调用命令 command,并传递这个命令3个参数:与客户端连接 的通道描述符、客户端的 IP 地址和端口号.由此,子 结构拟动力试验中的通讯问题得到了有效的解决.

2 子结构边界条件模拟方法验证

为了验证本文子结构边界条件模拟方法的正确 性及考察子结构边界条件的影响,对如图 3 所示的 一榀单层单跨钢结构框架进行子结构拟动力试验. 试验模型层高 3 m,跨度 6 m,其中,楼板重度为 23 kN/m³,板厚 0.12 m,板跨度 3 m. 假定基础与地基 刚接,不考虑楼板平面外的刚度.梁、柱构件截面均 采用截面为 200 mm×200 mm×12 mm×12 mm 的 H 型钢,材料选用 Q345 钢材,梁、柱构件采用基于 柔度法的纤维单元模拟. 屋面活荷载取 2.0 kN/m². 结构的输入地震波采用 EI-Centro 地震波,时间间 隔取为 0.02 s,地震持时 15 s. 结构阻尼采用 Rayleigh 阻尼. 试验中,取左边柱作为试验子结构,余下





部分作为数值子结构.分别考虑以下 3 种边界条件: 1)仅考虑水平位移;2)同时考虑水平位移与转角;3) 同时考虑水平位移、竖向位移和转角的严格边界 条件.

该单层单跨试验子结构滞回曲线、整体结构基 底剪力和底层层间位移时程曲线对比如图 4 所示.

从图 4 可以看出,仅考虑水平位移边界条件的 子结构滞回曲线与严格边界条件结果差别很大,从 而导致最大基底剪力误差达到-47.849 6%.考虑 水平位移与转角边界条件的试验结果则与严格边界 条件结果比较接近,最大基底剪力误差减小为 1.038 5%.3 种边界条件情况下,底层位移时程曲 线差别较小.

此外从试验结果可知,严格边界条件子结构拟 动力试验结果和用 OpenSEES 计算的整体结构时 程分析结果完全一致.因此后续对比则以严格边界 条件子结构拟动力试验结果为正确值.



图 4 单层单跨框架不同边界条件模拟结果对比 Fig. 4 Comparison of one-story one-bay frame simulation results under different substructure boundary condition

- 3 钢筋混凝土框架结构 3 种不同边界条件 模拟对比
- 3.1 单层 4 跨钢筋混凝土框架
- 3.1.1 结构模型概述

试验模型为一榀单层 4 跨钢筋混凝土框架,如 图 5 所示,层高为 3 m,跨度为 6 m,其中,楼板重度 为 23 kN/m³,板厚 0.12 m,板跨度 3 m. 假定基础 与地基刚接,不考虑楼板平面外的刚度. 混凝土选用 C30,采用非线性混凝土本构 Concrete01 模拟,钢筋 等级为 HRB400,采用非线性钢筋本构 Steel02 模 拟. 框架柱截面为 400 mm×400 mm,框架梁截面为 200 mm×500 mm,截面配筋如图 6 所示,梁、柱构 件采用基于柔度法的纤维单元模拟,楼面活荷载和 屋面活荷载统一取为 2.0 kN/m². 结构的输入地震 波采用 EI-Centro 地震波,时间间隔取为 0.02 s,地 震持时 15 s. 结构阻尼采用 Rayleigh 阻尼.



图 5 单层 4 跨钢筋混凝土框架模型 Fig. 5 Model of one-story four-bay reinforced concrete frame





3.1.2 子结构拟动力试验结果

对该框架结构取底层左边柱作为试验子结构, 余下部分作为数值子结构,考虑3种不同边界条件 进行子结构拟动力试验,边柱滞回曲线、基底剪力和 底层水平位移时程曲线结果对比如图7所示.



图 7 单层 4 跨框架不同边界条件模拟结果对比 Fig. 7 Comparison of one-story four-bay frame simulation results under different substructure boundary condition

从图 7 可以看出,仅考虑水平位移边界条件时 边柱的滞回曲线与正确值吻合度较差,考虑水平位 移与转角边界条件时,则吻合度较好.基底剪力模拟 误差较大,仅考虑水平位移边界条件时误差是 -5.368 7%.考虑水平位移与转角边界条件时误差 很小,仅为-0.046 1%.对于底层楼层水平位移,2 种简化边界条件模拟方案下的子结构拟动力试验结 果与考虑严格边界的子结构拟动力试验结果基本一 致,最大误差值为0.913 9%.可见,简化边界条件对 楼层的位移影响较小,而对单个构件滞回性能模拟 及楼层剪力的影响较大.

3.2 5层4跨钢筋混凝土框架

试验模型为一榀5层4跨钢筋混凝土框架,如



图 8 5 层 4 跨钢筋混凝土框架模型 Fig. 8 Model of five-story four-bay reinforced concrete frame

对该框架结构取底层左边柱作为试验子结构, 余下部分作为数值子结构,考虑3种不同边界条件 进行了子结构拟动力试验.边柱滞回曲线、基底剪力 和底层层间位移时程曲线对比如图9所示.

从图 9 可以看出,仅考虑水平位移边界条件时 边柱的滞回曲线与正确值吻合度很差,考虑水平位 移与转角边界条件时,则与正确值吻合较好.这可能 是对于本例的多层框架,底层柱顶的转角很小,而仅 模拟水平位移边界条件时,柱顶可以自由转动,柱子 刚度明显低估所引起.仅考虑水平位移边界条件时 基底剪力误差较大,达到一10.084 2%.而考虑水平 位移与转角边界条件时基底剪力误差很小,仅为 -0.043 7%.对于底层楼层水平位移,2 种简化边 界条件模拟方案下的子结构拟动力试验结果与考虑 严格边界的子结构拟动力试验结果非常接近,最大 差别仅仅为-0.725 6%和 0.046 7%.





图 9 5 层 4 跨框架不同边界条件模拟结果对比 Fig. 9 Comparison of five-story four-bay frame simulation results under different substructure boundary condition

3.3 8层4跨钢筋混凝土框架

试验模型为一榀 8 层 4 跨钢筋混凝土框架,如 图 10 所示,其余相关参数数据与上例一致.



图 10 8 层 4 跨钢筋混凝土框架模型 Fig. 10 Model of eight-story four-bay reinforced concrete frame

对该框架结构取底层左边柱作为试验子结构, 余下部分作为数值子结构,考虑3种不同边界条件 进行了子结构拟动力试验,边柱滞回曲线、基底剪力 和底层层间位移时程曲线结果对比如图11所示.

从图 11 可以看出,8 层框架的整体趋势与5 层 框架类似. 仅考虑水平位移边界条件时基底剪力误 差较大,达到-10.083 2%. 而考虑水平位移与转角 边界条件时基底剪力误差很小,仅为-0.048 5%.2 种简化边界条件模拟方案下的子结构拟动力试验底 层楼层水平位移结果与考虑严格边界的子结构拟动 力试验结果非常接近,最大差别仅仅为-0.727 3% 和-0.052 0%.



图 11 8 层 4 跨框架不同边界条件模拟结果对比 Fig. 11 Comparison of eight-story four-bay frame simulation results under different substructure boundary condition

4 结 论

本文研究基于 OpenSEES 的子结构拟动力试 验方法,通过 Tcl 语言编程,模拟了 3 种不同的子结 构边界条件,以单层单跨框架为例验证本文方法的 正确性.在此基础上,针对单层、5 层与 8 层 3 个 4 跨钢筋混凝土框架,采用杆系模型进行 3 种不同边 界条件模拟方案下的子结构拟动力试验,主要结论 如下:

1)对于单层单跨框架,仅考虑水平位移边界条件的子结构滞回曲线与严格边界条件的结果差别很大,而考虑水平位移与转角边界条件时差异明显减小.由于试验子结构在整体结构中的占比较大,简化边界条件模拟导致整体结构基底剪力误差较大,同时对结构底层位移也产生一定的影响.

2)对于多跨框架结构,仅考虑水平位移边界条件时,对柱滞回特性模拟存在明显的误差,且多高层框架的误差较单层框架大.其主要原因是由于忽略了柱顶的转动约束,导致低估了柱子刚度.因此,考虑水平位移与转角边界条件时,结果与严格边界条件基本一致.

3)对于多跨框架结构,由于试验子结构在整体 结构中的占比较小,虽然仅考虑水平位移边界条件 时滞回曲线模拟误差较大,但是对基底剪力的影响 较小,而对底层水平位移的影响则基本可以忽略.

4)建议在进行真实的子结构拟动力试验前,先 进行各种边界条件下的子结构拟动力模拟试验,再 根据试验需求和试验室设备条件,选择合适的整体 结构分析模型和子结构边界条件模拟方案.

参考文献

- [1] HAKUNO M, SHIDOWARA M, HARA T. Dynamic destructive test of a cantilever beam, controlled by an analogcomputer[J]. Transactions of the Japan Society of Civil Engineering, 1969, 171(12); 1-9.
- [2] MAHIN S A, SHING P S B, THEWALT C R, et al. Pseudo-dynamic test method—current status and future directions
 [J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(8): 2113

 2128.
- [3] 范云蕾,肖岩,郭玉荣,等.多层框架结构远程协同拟动力试验 方法研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2009,36(4):19-32.

FAN Yunlei, XIAO Yan, GUO Yurong, et al. Remotely col-

laborative pseudo-dynamic testing method for MDOF frame structure[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009,36(4):19-32. (In Chinese)

- [4] 郭玉荣,曾东,肖岩,等. 桥梁结构远程协同拟动力试验平台开发[J]. 湖南大学学报,自然科学版,2009,36(9):1-6.
 GUO Yurong,ZENG Dong,XIAO Yan, et al. Development of a remotely collaborative pseudo-dynamic testing platform for bridge structures[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(9): 1-6. (In Chinese)
- [5] 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 Zheng, JIANG Bicong. Development and applications of hybrid simulation and experimentation using OpenSEES[J]. Advances in Mechanics,2012,42(6): 804-820. (In Chinese)
- [6] 李玉顺,单炜,李俊华.子结构法拟动力试验技术研究[J].土
 木工程学报,2010,43(3):119-123.
 LI Yushun, SHAN Wei, LI Junhua. Study on substructure

pseudo-dynamic test [J]. China Civil Engineering Journal, 2010,43(3): 119-123. (In Chinese)

- [7] 范云蕾,郭玉荣,肖岩,等. 多层框架结构远程协同拟动力试验 研究[J]. 土木工程学报,2011,44(2):28-35.
 FAN Yunlei, GUO Yurong, XIAO Yan, *et al.* Study on remote collaborative pseudo-dynamic tests of multi-story frames
 [J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(2):28-35.
 (In Chinese)
- [8] 杨格,王贞,吴斌,等. 建筑结构混合试验平台 HyTest 开发研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(11):149-156.
 YANG Ge, WANG Zhen, WU Bin, *et al.* Development of HyTest for structural hybrid simulation[J]. Journal of Building Structures, 2015,36(11):149-156. (In Chinese)
- [9] 黄民元,郭玉荣. NetSLabOSR 远程协同拟动力试验平台的开

发研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2017,44(1):87-94.

HUANG Minyuan, GUO Yurong. Research and development of remote collaborative pseudo dynamic test platform NetSLabOSR[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2017, 44(1): 87-94. (In Chinese)

 [10] 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. (In Chinese)

- [11] 王向英,田石柱. 子结构地震模拟振动台混合试验原理与实现
 [J]. 地震工程与工程振动,2009,29(4):46-52.
 WANG Xiangying, TIAN Shizhu. Principle and implementation of the hybrid testing method based on substructure techniques by using shaking table[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2009, 29(4):46-52. (In Chinese)
- [12] 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 Hongxing, CAI Xingjiang, TIAN Shizhu. Hybrid simulation testing technology with OpenFresco framework[J]. Sichuan Building Science, 2013, 39(4):209-212. (In Chinese)
- [13] 郭玉葉,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 Yurong,LIU Zhongzhen. Research on substructure pseudo-dynamic test method based on OpenSEES[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences,2015,42(9):1-7. (In Chinese)