

文章编号: 1000-4750(2011)12-0020-07

基于多尺度模型的钢框架抗震性能分析

石永久,*王 萌, 王元清

(清华大学土木工程系, 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 为了在保证一定计算效率的条件下, 尽可能的提高钢框架抗震性能有限元分析的精度, 该文采用通用有限元软件 ABAQUS 建立非线性有限元模型, 深入探讨了利用多尺度模型的方法解决钢框架抗震计算问题。建立钢框架梁柱节点的板壳、杆系以及多尺度模型, 并与国内外典型节点试验进行对比分析, 验证有限元微观模型与宏观模型界面连接方法的可行性, 有效实现不同尺度模型间的变形协调; 进行在典型地震波下不同高度钢框架的弹塑性时程计算, 并比较几种模型的地震响应以及计算效率。结果表明: 多尺度有限元模型在保证一定计算效率的同时可更为逼真的模拟复杂受力构件的边界状况及其在整体结构响应中的性能; 随着框架层数以及地震波持续时间的增加, 其优势越来越明显, 证明利用多尺度模型方法是在精度和计算代价之间的一个均衡解决途径, 为今后的工程抗震分析提供有力的工具。

关键词: 钢框架; 抗震性能; 多尺度计算; 界面连接; 有限元分析; 弹塑性时程分析

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A

SEISMIC BEHAVIOR ANALYSIS OF STEEL FRAME BY MULTI-SCALE CALCULATION METHOD

SHI Yong-jiu , *WANG Meng , WANG Yuan-qing

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry,

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

Abstract: In order to ensure the computational efficiency and to improve the accuracy of finite element seismic analysis of steel frames, nonlinear finite element model is established using general finite element software ABAQUS. The application of multi-scale model in solving seismic behaviour of steel frames is discussed. The steel beam-column connections, members and multi-scale models are established, and then are proved to be valid through comparisons with typical connection tests. Elastic-plastic time-history analysis is performed to the steel frame with different height under typical seismic waves, and the computation efficiency is compared between several models. The results show that: multi-scale finite element model, with good computational efficiency, can simulate the boundary conditions of components under complex loads; with more layers involved and longer earthquake duration, the advantage becomes more evident, proving the use of multi-scale model is a balanced solution between accuracy and computation cost.

Key words: steel frame; seismic behavior; multi-scale calculation; interface connection; finite element analysis (FEA); elastic-plastic time-history analysis

收稿日期: 2010-03-30; 修改日期: 2010-09-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(90815004)

作者简介: 石永久(1962—), 男, 黑龙江鸡东人, 教授, 博士, 博导, 从事高层钢结构抗震研究(E-mail: shiyj@mail.tsinghua.edu.cn);

*王 萌(1985—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士生, 从事高层钢结构抗震研究(E-mail: wangmeng1117@gmail.com);

王元清(1963—), 男, 安徽人, 教授, 博士, 博导, 从事钢结构断裂研究(E-mail: wang-yq@mail.tsinghua.edu.cn).

近年来, 高层建筑结构在我国各地大量兴建, 特别是在高烈度地震区, 高层钢框架结构的抗震已成为结构工程界重点研究和关注的问题^[1]。目前进行高层钢框架结构在强震作用下的弹塑性时程分析或倒塌分析时^[2-3], 主要采用下列结构计算模型和方法: 杆系模型, 实体模型, 多尺度模型(多维混合模型)。其中: 杆系模型难以追踪构件和节点的局部塑性失稳和承载力退化的破坏机制; 实体模型的计算量巨大, 对计算机软硬件条件要求高, 目前还难以解决计算规模和存储空间的要求。基于以上的原因, 多尺度模拟和计算是一个正在迅速发展的热点, 已经在多个领域得到广泛应用, 它是在精度和计算代价之间的一个均衡解决途径^[4]。在结构有限元分析领域, 国内外的研究人员对多尺度计算进行了初步的研究探索和实践^[5-9], 其核心理念为: 对所关心的局部或对结构抗震性能有主要影响的部分建立精细模型, 其他部分利用宏观模型, 通过适当的连接方式, 使得宏观模型与微观模型协同计算, 更好把握结构的整体受力特征和微观破坏过程, 为工程实际提供更为准确的参考依据^[4]。

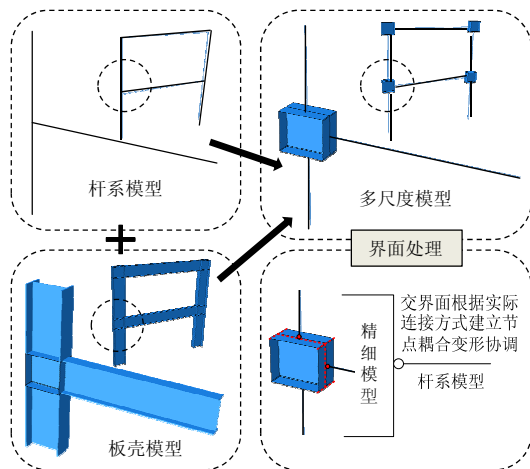


图 1 典型钢框架多尺度模型以及界面连接方式
Fig.1 Typical steel frame multi-scale models and interface connection methods

本文采用通用有限元软件 ABAQUS, 分别建立钢框架节点、整体框架的壳单元模型、梁单元模型以及梁单元壳单元混合多尺度模型(图 1), 并结合国内外典型节点试验, 来验证多尺度模型中精细与宏观模型界面连接方式的可靠性, 从而进行在典型地震波下不同层数钢框架的弹塑性时程分析计算, 对比几种模型的地震响应以及计算, 进而说明多尺度模型的优越性和可操作性, 为今后的工程应用提供有力的工具。

1 多尺度模型界面连接验证

精细模型与宏观模型界面的有效连接是保证多尺度计算实现的前提。通过不同尺度单元间的协同, 实现框架复杂节点微观模型和整体框架模型的多尺度组合。

界面处的连接是在不损失宏观模型自由度的同时, 尽可能不增加微观模型的额外约束^[4]。梁单元模型-实体单元模型连接、梁单元模型-壳体单元模型连接和壳单元模型-实体单元模型连接的原理基本相同。在钢框架结构中, 虽然壳单元可以较为准确的模拟实际情况, 但由于计算效率的限制, 工程常使用梁单元进行模拟计算。所以为了更好的和工程实际相联系, 本文以梁单元模型-壳体单元模型连接为例, 说明界面连接技术。由于壳体单元存在平面外的转角自由度, 而梁单元结点存在 3 个空间转动自由度, 不同尺度模型间转动自由度的传递按照平截面原则。

在钢框架结构中, 杆系模型不能够考虑细节的构造和节点的剪切域变形, 所以利用壳单元与杆系单元相结合的形式, 一方面可以弥补杆系模型计算上的缺陷, 另一方面提高框架的计算效率。

在 ABAQUS 中利用 Interaction 的 Couple 功能让壳单元与梁单元连接, 共同受力。其中 coupling 命令的物理意义保证连接截面与节点之间转动以及梁横向位移协调。

为证明此种连接的可靠性, 下面利用国内外的节点试验^[10,11]进行验证。

1.1 陈宏等人试验

陈宏^[12]等人的试验选取常规多层钢框架结构在侧向荷载作用下梁柱反弯点之间典型单元, 试件采用足尺模型。梁翼缘与柱翼缘焊接, 梁腹板与柱翼缘上耳板通过高强度螺栓连接。梁柱均为焊接 H 型钢, 梁柱截面尺寸根据文献[12]的要求确定(图 2(a))。采用 Q235B 钢材, 实测屈服强度的平均值为 270N/mm^2 , 根据实测曲线作为输入有限元模型中的钢材本构。试件加载装置如图 2(a)所示。试验中在梁端施加循环往复荷载, 加载分为 2 个阶段, 试件屈服前采用荷载增量控制, 分 3 级, 每级循环 1 次; 在节点出现塑性屈服后采用位移增量控制, 位移步长为 10mm 一级, 每级循环 2 次, 直至构件破坏。

本文选取其中标准节点以及“狗骨头”型节点^[13]分别建立板壳模型、杆系模型、多尺度模型并

与试验结果进行对比。以往的杆系模型节点域近似刚接,考虑不了节点的剪切域变形,由于此试验翼缘宽厚比较小,梁局部屈曲现象并不明显,所以多尺度模型只在剪切域的部分建立壳单元,其他部分为梁单元。对于在梁端部有削弱进而改变塑性铰出现位置的节点,也可建立包含梁端部的多尺度模型。“狗骨头”型多尺度模型,对杆系单元赋予不同的截面,进而模拟对梁的削弱(图 2(b))。

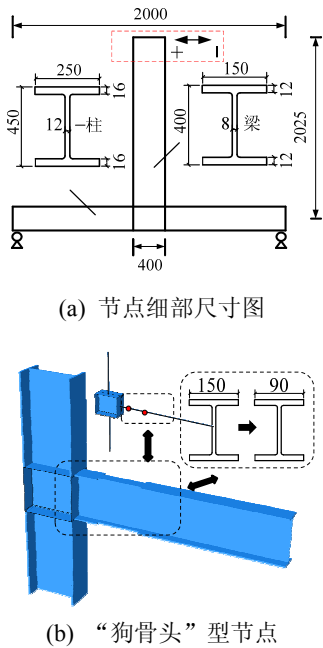


图 2 陈宏等人试验节点构造示意图 /mm
Fig.2 Test connection details of Chen Hong et al

板壳模型、杆系模型、多尺度模型与试验对比结果如图 3 所示,可以看出杆系模型强度和刚度明显比其他 3 种曲线低,而多尺度模型无论在刚度和承载力方面与壳体模型以及试验十分接近。

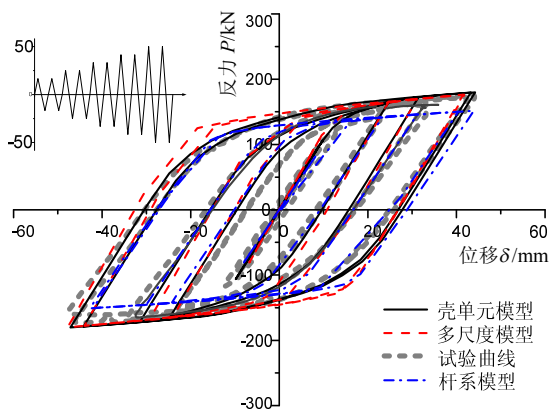


图 3 标准节点不同模型计算对比分析
Fig.3 The comparative analysis with different models of standard connection

从图 4 中可以看出,利用多尺度模型也可以对局部削弱的情况进行较好的模拟。在实际工程中,可以根据需要,分析宏观模型的缺陷以及与精细模型的区别,把工程关心以及重要的部分使用精细模型,而次要的部分采用宏观模型。

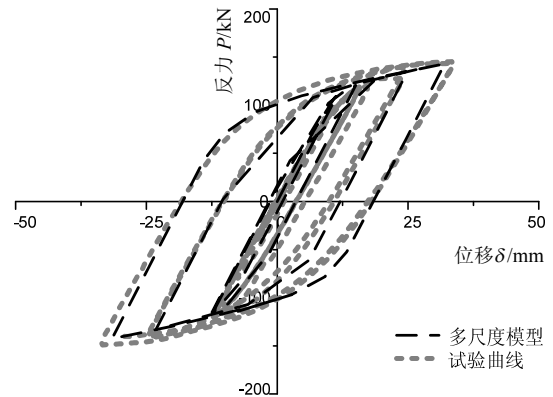


图 4 “狗骨头”型节点多尺度模型与试验计算对比分析
Fig.4 The comparative analysis with different models of ‘bone’ connection

1.2 Carlo A 等人试验

为了验证对于节点域有明显剪切变形的情况(图 5(a)),采用 Carlo A^[11]等人的试验。柱相对截面较弱,梁柱均为焊接 H 型钢,梁柱截面尺寸根据文献[14-15]要求确定,如图 5(b)所示。钢材实测强度如表 1 所示,钢材本构根据实际曲线输入。试件加载装置如图 5(b)所示。试验中在梁端施加循环往复荷载,均采用位移增量控制。分为两种加载制度:一种以 75mm 恒位移加载,直至结构破坏;一种逐

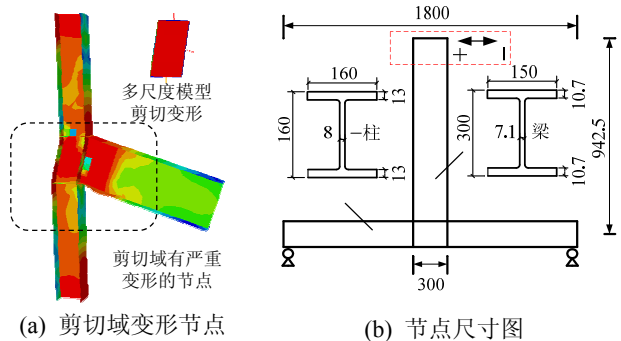


图 5 Carlo A 等人试验节点构造示意图 /mm
Fig.5 Connection details of Carlo A et al

表 1 试件材料参数
Table 1 Material Parameters of Specimens

	母材厚度/ mm	屈服强度 f_y / MPa	抗拉强度 f_u / MPa	极限应变 ϵ_l / (%)
梁翼缘	10.7	275	405	36
梁腹板	7.1	306	413	33
柱翼缘	13	323	460	28
柱腹板	8	396	490	22

步加载，位移步长为 10mm 一级，每级循环 2 次，直至构件破坏。本文分别建立节点的板壳模型、杆系模型、多尺度模型并与试验结果进行对比。

板壳模型、杆系模型、多尺度模型与试验对比结果如图 6 所示，可以看出杆系模型明显与其他 3 种曲线不同，而多尺度模型在刚度和承载力方面与板壳模型以及试验十分接近，在弯折的部分稍高于板壳单元。板壳单元和多尺度模型应力分布相差 5% 以内，所以无论宏观还是微观层面多尺度模型均有较好的表现。从图 6、图 7 中可以看出，不同加载制度下利用多尺度模型均可以对实际情况进行较好的模拟。

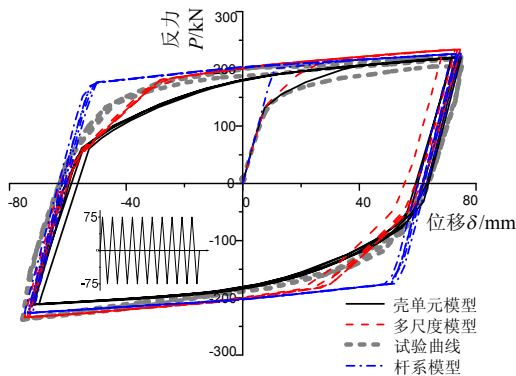


图 6 恒位移加载对比分析
Fig.6 Comparative analysis of constant displacement loading

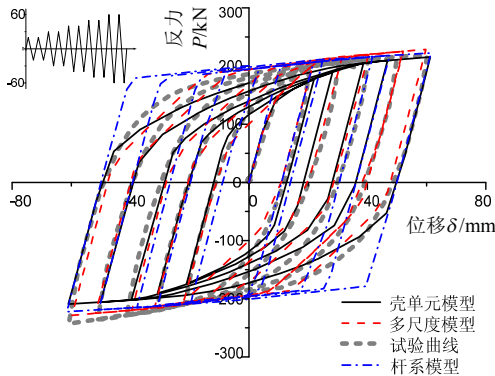
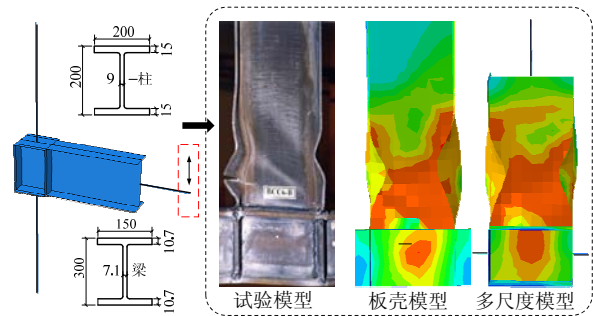
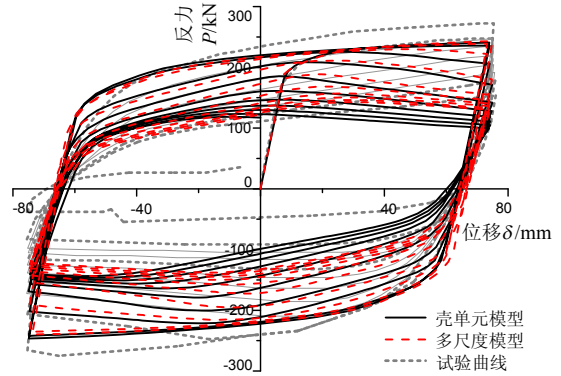


图 7 逐级位移增加加载对比分析
Fig.7 Comparative analysis of gradual displacement loading

为了探索带有局部屈曲现象的多尺度模型，根据 Carlo A^[11]等人的试验试件尺寸建立如图 8(a)所示的带梁端多尺度模型。施加 75mm 恒位移加载，直至结构破坏。从图 8(a)中可以看出有限元可以较好的模拟局部屈曲现象，试验、板壳以及多尺度模型的变形和荷载位移曲线的对比分析如图 8 所示。



(a) 可以计算局部屈曲的多尺度模型



(b) 恒位移加载对比分析

图 8 局部屈曲现象对比分析

Fig.8 Comparison of the phenomenon of local buckling

1.3 试验有限元对比分析

1) 无论剪切变形明显与否，宏观荷载位移曲线还是微观应力-应变，多尺度模型均有较好的表现。说明壳单元与杆系单元的连接符合平截面假定，能够变形协调。多尺度模型在刚度和承载力方面与板壳模型以及试验十分接近，而杆系模型与其他 3 种均有较大出入。

2) 多尺度模型比杆系单元可以更加准确的模拟节点的实际受力情况，从而可以证明宏观与精细模型界面连接的可靠性。

3) 利用多尺度模型可以对局部削弱的情况、局部屈曲现象进行较好的模拟。在不同加载制度下利用多尺度模型均可以对实际情况进行较好的模拟。实际工程中，可以根据需要把工程关心以及重要的部分使用精细模型，而次要的部分采用宏观模型。

2 钢框架多尺度模型抗震性能分析

为研究多尺度模型在抗震中的应用，采用陈宏^[10]等人的试验节点所在的足尺模型，建立两层框架以及四层框架模型(图 9)，利用 ABAQUS 有限元软件建立板壳、杆系以及多尺度模型，输入多种典型地震波进行地震响应以及计算效率的对比分析。

在钢框架结构中，杆系模型与壳体模型在模拟实际情况的区别就在于是否能考虑剪切域变形，所以多尺度模型在剪切域的部分采用壳单元模型，其他部分采用杆系模型，既可以弥补杆系模型计算上的缺陷，又能够提高框架的计算效率。

从第 1 部分的对比分析中可以看出壳单元与试验吻合较好，认为壳单元可以较为真实的模拟实际情况，所以以下的计算分析认为多尺度模型与壳单元模型的对比即为多尺度模型与实际情况的对比分析。

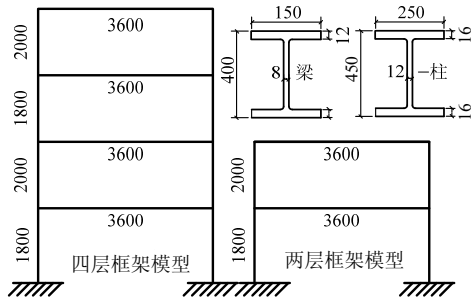
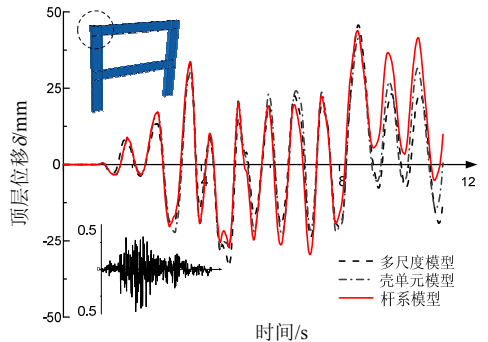


图 9 框架模型详细尺寸

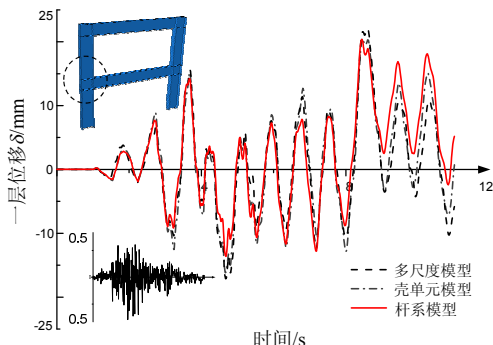
Fig.9 Detailed dimensions of frame models

2.1 两层框架计算

采用 Koyna 地震波，峰值加速度 0.5g。顶层和首层地震响应如图 10 所示。



(a) 顶层位移响应



(b) 一层位移响应

图 10 Koyna 地震波下两层框架位移响应

Fig.10 Seismic displacement response of a two-story frame under Koyna wave

2.2 四层框架计算

2.2.1 Koyna 地震波

采用 Koyna 地震波，峰值加速度 0.5g。顶层地震位移响应如图 11 所示。

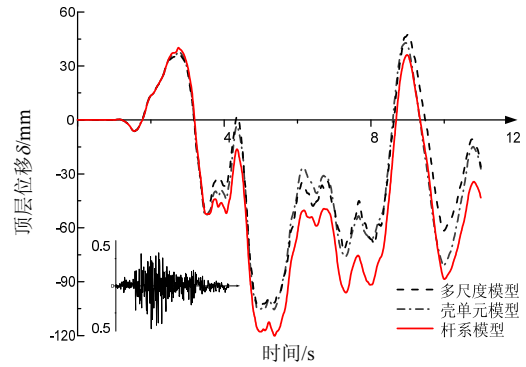


图 11 Koyna 地震波下四层框架位移响应

Fig.11 Seismic displacement response of a four-story frame under Koyna wave

2.2.2 El Centro NS 地震波

采用 El Centro NS 地震波，峰值加速度 0.4g。顶层地震响应如图 12 所示。

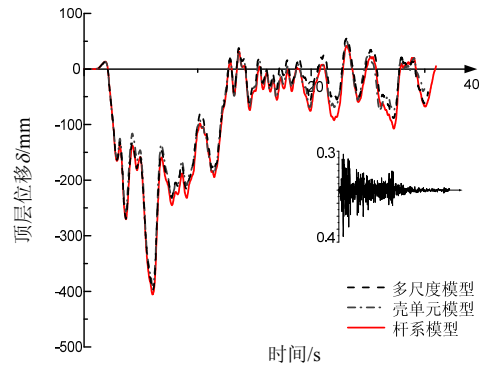


图 12 El Centro NS 地震波下四层框架位移响应

Fig.12 Seismic displacement response of a four-story frame under El Centro NS wave

2.2.3 San Fernando 地震波

采用 San Fernando 地震波，峰值加速度 0.35g。顶层地震响应如图 13 所示。

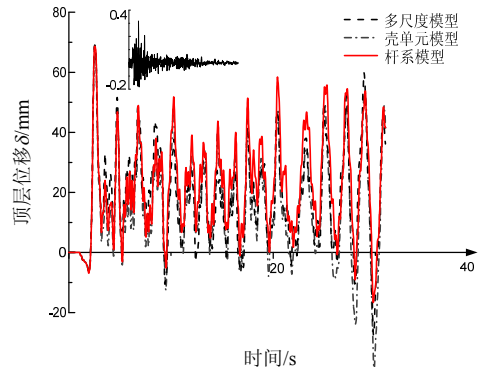


图 13 San Fernando 地震波下四层框架位移响应

Fig.13 Seismic displacement response of a four-story frame under San Fernando wave

2.2.4 汶川地震波

采用汶川地震波,取其中包含峰值加速度 0.35g 的 20s 进行计算。顶层地震响应如图 14 所示。

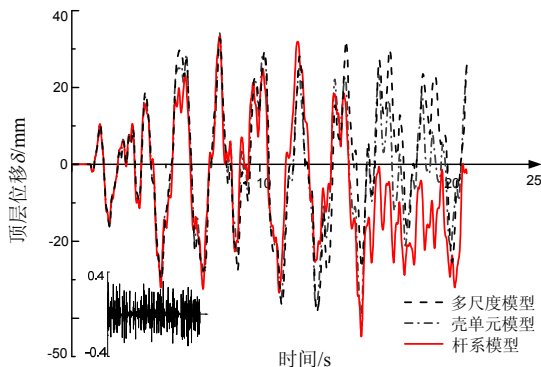


图 14 汶川地震波下四层框架位移响应

Fig.14 Seismic displacement response of a four-story frame under Wenchuan wave

2.3 计算结果分析

1) 计算准确度分析。

从图 10、图 11、图 12、图 13 和图 14 两层框架、四层框架不同地震波下不同地震反应的对比分析,可以看出:多尺度模型和壳单元模型地震响应基本一致,吻合良好,可以较为准确的表现结构的地震反应;杆系模型表现并不稳定,与其他两种模型计算结果相差较大,尤其在最大位移反应上,杆系在很多时候反应小于板壳结构,造成不安全因素;有时会过高估计结构反应,造成结构上的浪费。

2) 计算时间对比分析。

表 2 对比了几种有限元模型计算效率,从表 2 可以看出,采用多尺度模型在保证精度的同时时间明显降低,梁单元模型用时最少,但其准确性上不如其它两种模型好,所以多尺度是在精度和计算代价之间的一个均衡解决途径,而且随着层数和计算波长的增加,其优势表现的越来越突出。

表 2 三类模型地震响应下结构计算时间对比分析 /min
Table 2 Computation time of seismic response under three types of earthquake

计算结构	输入地震波	壳单元模型	多尺度模型	梁单元模型
两层框架	Koyna 地震波(10s)	20	8	3
	Koyna 地震波(10s)	30	12	5
四层框架	El Centro NS 地震波(30s)	60	26	13
	San Fernando 地震波(30s)	54	25	12
	汶川地震波(20s)	40	20	10

3 结论

本文采用通用有限元软件 ABAQUS,分别建立

节点、钢框架的壳单元模型、梁单元模型以及梁单元壳单元混合多尺度模型,并结合国内外不同梁柱尺寸节点试验以及在典型地震波下不同高度钢框架的弹塑性时程计算,得到如下结论:

(1) 基于通用有限元软 ABAQUS,通过与节点试验的对比分析,验证多尺度模型精细模型和宏观模型界面连接的合理性和科学性,在今后的计算中可以按照此连接方法进行。

(2) 通过建立钢框架抗震杆系、板壳、多尺度有限元模型,并输入多种地震波进行弹塑性时程计算,对比不同模型的地震响应及计算效率。多尺度有限元模型在保证一定计算效率的同时可更为逼真的模拟复杂受力构件的边界状况及其在整体结构响应中的性能;而且随着框架层数以及地震波持续时间增加,其优势越来越明显。

(3) 通过“狗骨头”型节点以及局部屈曲形式的多尺度模型算例计算表明:如果在梁端部有削弱进而改变塑性铰出现位置或者出现局部屈曲现象,也可建立包含梁端部的多尺度模型,在保证一定计算效率的同时大大提高计算准确度。所以多尺度是在精度和计算代价之间的一个均衡解决途径。

(4) 通过分析以及总结可得到利用多尺度模型计算的一般步骤:① 在分析前对分析对象进行初步判别,多尺度模型中的细化部分模型应能够涵盖所关心的细节受力行为和对结构整体受力行为影响较大的部分;② 根据需要分析宏观模型的缺陷以及与精细模型的区别,抓住主要矛盾,忽略次要因素;③ 建立宏观模型与精细模型的接触,根据平截面假定保证变形协调。

参考文献:

- [1] 国家自然科学基金委员会. 学科发展战略研究报告-建筑、环境与土木工程 II [R]. 北京: 科学出版社, 2006. National Natural Science Foundation Committee. Subject development strategy research report-Construction, environment and civil engineering II [R]. Beijing: Science Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 汪梦甫, 周锡元. 高层建筑弹塑性分析方法及抗震性能评估的研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(11): 44-49. Wang Mengfu, Zhou Xiyuan. Modified pushover analysis and seismic performance evaluation for tall building [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11): 44-49. (in Chinese)
- [3] Murat S, JagMohan H. Dynamic analysis of buildings for earthquake resistant design [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2003, 30: 338-359.

- [4] 陆新征, 林旭川, 叶列平. 多尺度有限元建模方法及其应用[J]. 华中科技大学学报, 2008, 25(4): 76—80.
Lu Xinzheng, Lin Xuchuan, Ye Lieping. Multiscale finite element modeling and its application in structural analysis [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2008, 25(4): 76—80. (in Chinese)
- [5] Li Z X, Chan H T, Yu Y, et al. Concurrent multi-scale modeling of civil infrastructures for analyses on structural deterioration-Part I: Modeling methodology and strategy [J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2009, 45(11): 782—794.
- [6] Oskayc, Fish J. Multi-scale modeling of fatigue for ductile materials [J]. International Journal of Multi-scale Computational Engineering, 2004, 2(3): 1—30.
- [7] Ladeveze P, Nouy A, Loiseau O A. Multi scale computational approach for contact problems [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(43): 4869—4891.
- [8] 李兆霞, 孙正华, 郭力, 陈鸿天, 余洋. 结构损伤一致多尺度模拟和分析方法[J]. 东南大学学报, 2007, 37(2): 251—260.
Li Zhaoxi, Sun Zhenghua, Guo Li, Chen Hongtian, Yu Yang. Concurrent multi-scale modeling of structures and damage analyses [J]. Journal of Southeast University, 2007, 37(2): 251—260. (in Chinese)
- [9] 孙正华, 李兆霞, 陈鸿, 殷爱国. 考虑局部细节特性的结构多尺度模拟方法研究[J]. 特种结构, 2007, 24(1): 71—75.
Sun Zhenghua, Li Zhaoxia, Chen Hong, Yin Aiguo. The methods of multi-scale simulation considering the details of the structural characteristics [J]. Special Structures, 2007, 24(1): 71—75. (in Chinese)
- [10] 陈宏. 高层钢结构节点地震脆断机理及抗震性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2001.
Chen Hong. Seismic brittle fracture mechanism and Seismic behavior of steel beam-column connections in tall buildings [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2001. (in Chinese)
- [11] Carlo A, Raffaele P. Failure criteria and cumulative damage models for steel components under cyclic loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65: 751—765.
- [12] 中华人民共和国建设部. GB50011-2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB50011-2001 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001. (in Chinese)
- [13] Egor P, Yang T, Chang S. Design of steel MRF connections before and after 1994 northridge earthquake [J]. Engineering Structures, 1998, 20(12): 1030—1038.
- [14] EN 1998-1:2005, Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings [S]. Brussels, 2005.
- [15] EN 1993-1-1 2005, Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings [S]. Brussels, 2005.

(上接第 12 页)

- [10] Meguid S A, Tan M A. Photoelastic analysis of the singular stress field in a biomaterial wedge [J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(1): 68—74.
- [11] Dundurs J. Discussion of edge-bonded dissimilar orthogonal elastic wedges under normal and shear loading [J]. Transactions ASME, Journal of Applied Mechanics, 1969, 36(2): 650—652.
- [12] 雷振坤, 云海, 赵燕茹, 潘学民. 数字光弹性中材料条纹常数的自动确定[J]. 工程力学, 2009, 26(12): 40—45, 51.
Lei Zhenkun, Yun Hai, Zhao Yanru, Pan Xuemin. Automatic determination of fringe constant in digital photoelasticity [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(12): 40—45, 51. (in Chinese)
- [13] Pinit P, Umezaki E. Digitally whole-field analysis of isoclinic parameter in photoelasticity by four-step color phase-shifting technique [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(7): 795—807.
- [14] Lei Zhenkun, Yun Hai, Zhao Yanru, XingYongming, Pan Xuemin. Study of shear transfer in Al/epoxy joint by digital photoelasticity [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47(6): 701—707.