

多尺度有限元建模方法及其应用

陆新征, 林旭川, 叶列平

(清华大学 a.土木工程系; b.结构工程与振动教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 在有限的计算条件下, 为了尽可能的提高结构有限元分析的精度, 本文引入了有限元多尺度计算方法。通过寻找有限元微观模型与宏观模型的界面连接方法, 从而使精细的有限元模型可以自然地植入宏观模型, 有效实现不同尺度模型间的变形协调。通过编制用户子程序, 在有限元软件中对界面连接的合理性进行了算例验证, 为多尺度有限元计算在结构分析中的应用提供了条件。最后采用多尺度建模方法, 给出了钢结构弹塑性时程分析的应用实例。

关键字: 多尺度计算; 界面连接; 有限元; 工程应用; 弹塑性时程分析

中图分类号: TU311.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7037(2008)04-0076-05

1 概述

随着有限元技术的迅速普及, 工程非线性计算已经得到了迅猛发展。目前常用的工程非线性计算可以分为以下两大类: (1) 基于杆系模型、壳模型、宏模型等宏观模型的整体结构非线性计算; (2) 基于实体单元的复杂构件、节点等局部结构非线性计算。随着技术的不断发展, 上述两类分析都日渐难以满足工程计算更高精细化的要求, 各自问题分别阐述如下:

对于宏观模型而言, 虽然具有计算量小的优势, 但却难以反映结构破坏的微观机理, 对以下一些微观行为, 如①构件的局部失稳破坏; ②节点破坏; ③接触问题(接触分析往往需要准确了解构件的形状, 而宏观单元由于把实际三维结构简化为一维杆件或二维壳体, 在接触分析方面也存在困难); ④温度场等多物理场分析(如火灾导致结构破坏分析中, 构件截面不同部位存在温度差异和热量传导)等, 存在较大困难。

而基于实体单元的微观分析, 虽然可以较好地把握结构的微观破坏过程, 但由于计算机能力和建模工作量的限制, 对于实际复杂结构完全依赖微观模型模拟是不现实的。而从整体结构中取出局部构件进行微观分析, 又难以准确确定其边界条件。特别是对于地震等复杂往复灾害荷载, 构件边界条件就变得更加复杂, 事先难以准确预知,

进而构件计算得到的滞回性能、耗能能力、变形能力和实际情况也可能有显著不同^[1]。故目前工程计算迫切需要提出一个可以同时模拟结构局部微观破坏和宏观整体行为的计算模型。而多尺度计算就是解决该问题的有效途径。

多尺度计算近年来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。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^[2,3]和实践^[4,5]。多尺度计算模型的构造方法一般可分为尺度分离和尺度间耦合两种^[6-9], 前者着眼于在分析对象的不同部分采用不同尺度, 后者着眼于寻找宏观与微观之间的联系。对于工程结构而言, 目前需求最为迫切的是基于尺度分离思想的多尺度计算模型, 即根据结构构件或节点的复杂程度和破坏过程中的非线性程度, 选择适当尺度的分析模型, 并实现不同尺度模型之间的协同计算。通过选择合适的连接方式, 使得宏观尺度模型与微观尺度的协同计算, 则可更好把握结构的整体受力特征和微观破坏过程, 从而能更好理解、把握结构的性能。

基于上述思想, 本文在一复杂混合结构框架中进行了结构多尺度计算的尝试。通过开发不同尺度单元间的协同工作界面技术, 实现了框架复杂节点微观模型和整体框架模型的多尺度弹塑性时程计算, 计算结果表明, 多尺度模型可以更加准确的模拟节点的实际受力情况, 从而可以更有

收稿日期: 2008-06-25

作者简介: 陆新征(1978-), 男, 安徽芜湖人, 副教授, 博士, 研究方向为混凝土数值方法, luxinzheng@263.net。

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划(2006BAJ03A02-01); 国家自然科学基金(50808106)。

效的把握节点和整个结构的抗震性能。

2 不同尺度模型的界面连接

2.1 界面连接原理及其实现

多尺度计算的难点是如何保证不同尺度单元之间界面连接的科学合理。工程结构多尺度计算中，常见不同尺度单元的连接情况可分为：梁单元构件与壳单元构件的连接；梁单元构件与实体单元构件的连接、壳单元构件与体单元构件的连接三种。

由于不同单元类型结点的自由度和精度不同，因此很难实现没有任何“瑕疵”的连接。三类单元构成的模型由微观到宏观排序如下：实体单元模型、壳单元模型、梁单元模型。界面处的连接应该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。实际上，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-实体单元模型在壳单元平面外的连接原理基本相同，下面以梁单元模型-实体单元模型连接、梁单元模型-壳体单元模型连接为例，说明界面连接技术。

2.1.1 不同尺度模型轴向位移与转角的协调

由于壳单元存在平面外的转角自由度，而梁单元结点存在三个空间转动自由度，不同尺度模型间转动自由度的传递按照平截面原则。如图1为梁单元模型与实体单元模型或壳单元的连接，为了表达方便，首先引入局部坐标系 xoy ，以宏观模型的结点 B 为原点， x 轴平行于宏观模型的梁轴线方向， y 轴垂直于梁轴线，如果存在 z 轴垂直于 x 轴和 y 轴，并符合右手螺旋法则。那么在局部坐标系下，平截面原则可以定义为对于任意精细模型在界面上的点满足：

$$x_{Ai} = 0 \quad i=1,2,3,\dots,n \quad (1)$$

式中， x_{Ai} 为 Ai 点在局部坐标系中的 x 轴的坐标。式(1)也保证了宏观模型点 B 总是位于精细模型界面上的结点所在的面上，即轴向位移也是协调的。

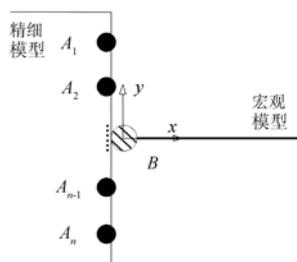


图1 同尺度模型界面结点关系

2.1.2 不同尺度模型径向位移协调

为了使梁单元与体单元或壳单元组成的模型能够沿梁横向位移协调，界面两侧模型的结点局部坐标需满足以下关系：

$$y_B = \sum_{i=1}^n \beta_i y_{Ai}, \quad z_B = \sum_{i=1}^n \beta_i z_{Ai} \quad (2)$$

式中， y_B, z_B 分别为 B 点在局部坐标系中的 y 轴、 z 轴坐标； y_{Ai}, z_{Ai} 分别为 Ai 点在局部坐标系中的 y 轴、 z 轴坐标； β_i 为 Ai 点对 B 点纵坐标的影响权重系数，其物理意义表示该结点的刚度与截面上所有结点刚度总和的比值，且满足 $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$ 。对于结点分布均匀的对称截面，可以取 $\beta_i = 1/n$ 。

可见， B 结点在微观模型截面的相对横向位置，由微观模型截面上所有节点共同决定。这种操作可以尽可能的减小界面连接对微观模型的额外约束。

2.1.3 大转角问题与坐标系的选择

如果对界面直接采用整体坐标系，则当界面存在大转角时，很难表达界面两侧不同尺度模型结点的相对关系。故本文建议采用节点局部坐标系，坐标系随构件变形而转动（图1），不仅可以适应大转角问题，而且使得不同尺度模型界面结点的关系简化。

2.2 界面连接算例

```

subroutine uforms(s,nretn,long,ndeg,istyp,iti,
    1istart,itie,longsm,itiem,ipass,numnp,dicos,
    2transm,xord,itransid,nbctra,ncrd,tdicos,levelm,
    3ii,longtm,disp,ityfl)
    include '../common/implicit'
    dimension s(ndeg,longsm),iti(longtm,itiem),
    1 dicos(ndeg,ndeg),transm(6,*),xord(ncrd,*),
    2 itransid(*),tdicos(ndeg,ndeg),disp(ndeg,*)
    [定义连接约束矩阵]
    return
end
    
```

图2 uforms 子程序结构

根据上述原理，本文利用通用有限元软件 MSC.MARC 提供的节点局部坐标系、节点自由度耦合功能和用户自定义子程序功能，实现了不同尺度单元界面的连接。具体操作包括：①对界面处的节点定义局部坐标系；②采用 link 模块下的 RBE'2 连接功能实现界面处的轴向位移和转角协调；③开发用户自定义的子程序 UFORMS^[10] 实现梁横向位移的协调。UFORMS 子程序需要定

义连接约束矩阵,用户可以任意设定节点之间位移的数学关系,因而适用于各类不同单元界面连接问题。UFORMS 程序的接口如图 2 所示。

以一个外径 30 mm,壁厚 3 mm,长 180 mm,一边固端,另一边自由的正八边形筒模型压弯加载算例来验证本文建议连接的准确性。材料应力应变关系采用双折线模型,初始模量为 200 GPa,屈服后硬化模量为 3 GPa,材料泊松比为 0。建立 3 个有限元模型(如图 3): A 模型全部采用 52 号梁单元;另两个(B1 和 B2)均采用多尺度模型,只有多尺度界面位置不同,多尺度模型一段采用壳单元,另一段采用纤维梁单元,并采用本文建议的多尺度模型间的界面连接方法。在 MSC.Marc 软件中,加载过程如下:在筒顶沿轴向施加恒定轴压力 1 000 N,在垂直于筒轴线方向施加强制位移。简体顶端横向荷载-位移曲线见图 4,两种分析模型的计算结果基本吻合,三条曲线屈服前后刚度均吻合良好。细微差别主要是单元网格密度差异所致,对于工程分析可以忽略。计算的壳单元上的应力分布见图 5,在固端周围两侧分别出现最大拉和压应力;等效塑性应变分布见图 6,在固端出现较大的塑性应变,形成塑性铰。如图 5 和图 6,两种模型的构件轴线变形非常接近,界面处理实现了变形协调。模型 B1 在简体中段界面附近的云图与 B2 中部完全壳单元的云图吻合良好,可见,界面区域未出现应力集中等问题。

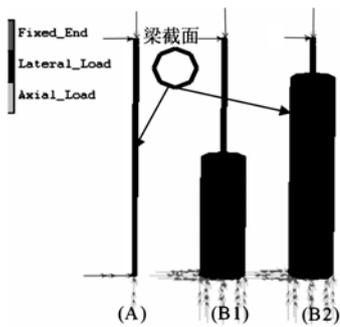


图 3 多尺度模型与梁单元模型

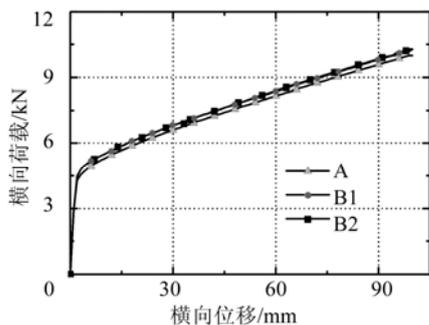


图 4 梁端横向荷载-位移关系曲线

以上算例表明,本文建议的界面连接方法可以实现杆单元宏观模型与壳单元、实体等细观模型的不同尺度间的过渡,从而可以将精细模型植入整个宏观杆单元模型结构中,进行多尺度结构计算。

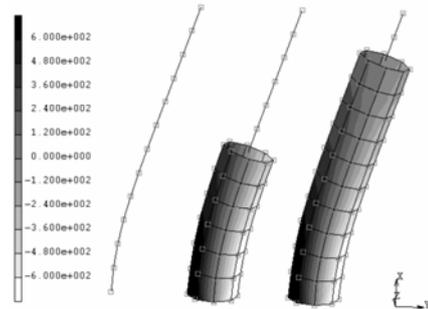


图 5 应力分布

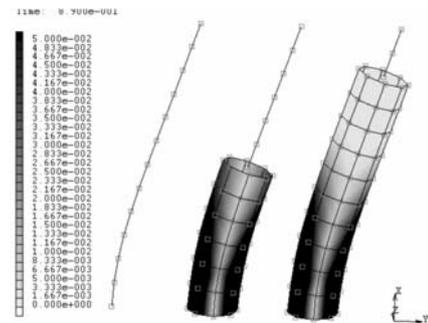


图 6 等效塑性分布

3 结构算例

结构整体分析中,框架结构的梁柱节点往往直接简化为“不会坏”的刚性节点,结构的损伤主要是梁柱端部出现塑性铰。实际上,这样的计算模型存在以下问题:一方面,节点并非理想刚性节点,节点的刚度对结构的抗震性能影响很大^[10];另一方面,节点区焊缝较多,板件复杂,其连接与构造往往是成为结构的最薄弱环节,1994 年美国北岭地震和 1995 年日本阪神地震中,很多梁柱刚性连接破坏,节点的连接与构造对钢框架的抗震性能影响较大,节点的破坏比构件的破坏对结构整体牢固性的影响更严重。为了在结构分析过程中观察节点附近的损伤细节,并建立更准确的节点模型,本文在上述界面连接方法基础上,对两跨六层的钢框架结构进行多尺度弹塑性时程分析,其中所有连接节点采用壳单元进行精细建模,杆件采用相对宏观的梁单元建模,典型的精节点模型如图 7,整体多尺度框架模型见图 8,地面运动加速度采用 1940 年 El Centro NS 波,峰值加速度 400 gal。

图 9 为结构达到最大侧移时刻的整体变形

图,可以发现,在梁柱较大弯矩作用下,梁柱夹角并呈理想直角,即理想刚性节点假设不完全成立。图10为该时刻第3层中部节点的塑性应变分布图,可以发现梁端上下翼缘两侧已经进入明显塑性,而翼缘中部则基本未进入塑性,这一点与一般计算模型的理想“塑性铰”有差别。可见,在有限计算条件下,多尺度分析是提高结构计算精度并反映更多局部细节的有效途径之一。

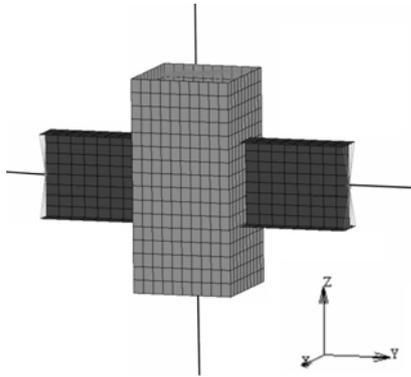


图7 节点精细模型

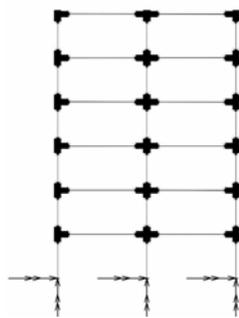


图8 多尺度框架模型

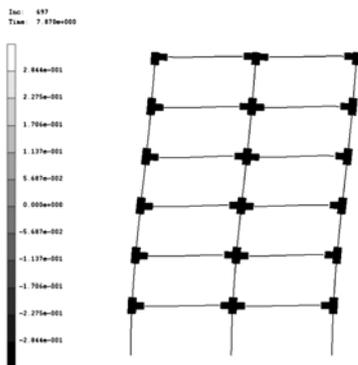


图9 结构变形(最大顶点侧移时刻)

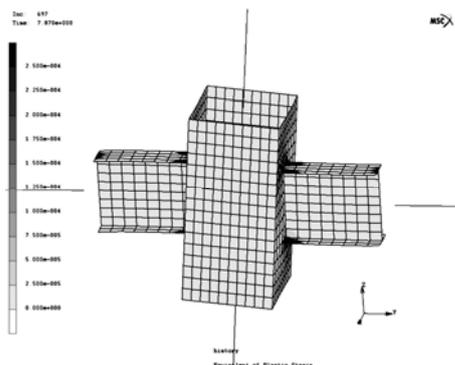


图10 节点等效塑性分布

4 结论

(1)多尺度计算有着广泛的应用领域,多尺度有限元计算方法可在有限的计算资源和时间下,有针对性的获得结构的宏观和微观力学性能,实现更高的计算效率。

(2)本文给出了针对框架杆系结构不同尺度有限元模型之间的界面连接方法,并基于通用有限元软件给出了算例,结果表明此方法可以有效实现不同尺度模型之间的变形协调。

(3)给出了多尺度有限元计算的工程算例。通过提出多尺度界面连接方法,将精细节点有限元模型植入由杆单元构成的宏观框架结构模型中,在整体结构的弹塑性时程分析中考察节点的受力性能,结果表明多尺度有限元模型可更加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。

参 考 文 献

- [1] 汪训流, 陆新征, 叶列平. 变轴力下钢筋混凝土柱的抗震性能[J]. 分析工业建筑, 2007, 37(12): 71-75.
- [2] 李兆霞, 孙正华, 郭力, 等. 结构损伤一致多尺度模拟和分析方法[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(02): 251-260.
- [3] 孙正华, 李兆霞, 陈鸿天, 等. 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.
- [4] Ladeveze P, Nouy A, Loiseau O. A Multiscale Computational Approach for Contact Problems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2002, 191(43): 4869-4891.
- [5] Khandelwal K, El-Tawil S. Multiscale Computational Simulation of Progressive Collapse of Steel Frames[C]//Proceedings of the ASCE Structures Congress, May 2005, NY, NY.
- [6] Broughton J Q, Abraham F F. Concurrent Coupling of Length Scales: Methodology and Application [J]. Phys. Rev. B., 1999, 60(4): 2391-2403.
- [7] Rudd R E, Broughton J Q. Concurrent Coupling of Length Scales in Solid State System[J]. Phys Stat Sol, 2000, 217(2): 251-291.
- [8] 杨建宏. 基于小波理论的多尺度计算方法[J]. 科技信息(教学科研), 2007, (36): 355-356.
- [9] MSC. Marc User's Manual. Volume D (User Subroutines and Special Routines)[R]. MSC, Software

Corporation, 2001.
 [10] 王元清, 王锁军, 吴 杰, 等. 组合节点刚度对组合

框架的抗震性能影响分析[J]. 郑州大学学报 (工
 学版), 2006, 27(2): 8-13.

Multiscale Finite Element Modeling and its Application in Structural Analysis

LU Xin-zheng, LIN Xu-chuan, YE Lie-ping

(a. Department of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry,
 Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: A methodology of connecting microscopic finite element model to macro model is proposed, which is important to carry out multiscale finite element analysis (FEA) of structures. Both the theory and the verifying example show that the methodology meets the deformation compatibility well at the interface between different-scale models. Based on the methodology, a precise microscopic finite element model is implanted into a macro frame structure model to form a multiscale model. In the end, a further example of application is given.

Key words: multiscale calculation; interface connection; finite element; engineering application; elasto-plastic time history analysis

(上接第 72 页)

[2] Rodrigues J P C, Neves I C, Valente J C. Experimental Research on the Critical Temperature of Compressed Steel Columns with Rest Rained Thermal Elongation[J]. Fire Safety Journal, 2000, 35: 77-98.
 [3] 计 琳, 赵均海, 翟 越, 等. 轴向约束对钢结构柱抗火性能的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(4): 64-69.

[4] 陈火红. Marc 有限元实例分析教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
 [5] 李国强, 韩林海, 楼国彪, 等. 钢结构及钢-混凝土组合结构抗火设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
 [6] 汪 敏, 石少卿, 刘仁辉. 轴向约束钢柱的抗火性能分析[J]. 工业建筑, 2007, 37(S): 645-648.

Nonlinear Analysis of the Behavior of H-Steel Columns with Different Constraints in Fire

WANG Xin-tang¹, ZHENG Xiao-yao¹, DING Yong¹, WANG Xue-jiao¹, XIANG Zhi-hai²

(1. Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
 2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: As steel structures play more and more important roles in the constructional engineering, the fire safety problem turned to be an inevitable and significant subject. Thus, it was especially important to carry out the research on the failure mechanism of steel structures in fire. Based upon the assumption that the varying temperature field on the steel component is described in ISO834 temperature curves, and considering the interaction of radiation and convection in fire, the finite element method was used to simulate the temperature field of H-steel column. Then, based on the temperature field, and considering the influence of material nonlinearity and geometric nonlinearity on the thermal response of steel component, the thermal-stress analysis of compressive steel column under the different constraints was carried out. The thermal response of steel components are discussed, including the model of failure, the stresses and displacements of the component with the constraints that the both ends are hinged, and one end hinged and the other restrained axially, respectively. The results show that the enhancement of axial constraint contrarily brings down the ultimate bearing capacity and the critical temperature of the steel column in fire to a certain extent.

Key words: nonlinear analysis; different constraint; H-steel column; behavior in fire