

文章编号: 1009-4881(2012)04-0073-04

DOI: 10.3969/j.issn.1009-4881.2012.04.019

## 多尺度有限元建模及在结构设计中的应用

黄银燊, 袁理明, 吕 鹏

(中南建筑设计院股份有限公司 湖北 武汉 430071)

**摘 要:** 对结构局部的二次分析难以确定局部模型的边界条件及加载方式,为使整体结构的分析和局部细节的分析同步进行,探讨了在 ANSYS 中将精细模型植入宏观模型进行多尺度建模的方法,并给出了算例验证。在一个复杂高层建筑结构的弹塑性动力时程分析中采用多尺度建模计算,结果表明,采用多尺度有限元建模分析并不显著增加计算资源,但可以得到更加合理的计算结果和更丰富的信息。

**关键词:** 有限元; 弹塑性时程分析; 多尺度; 结构设计

**中图分类号:** TU 311.41

**文献标识码:** A

## Multiscale finite element modeling and its application in structural design

HUANG Yin-shen, YUAN Li-ming, LV Peng

(Central - South Architecture Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

**Abstract:** To analyze the integral structure together with the detail parts of the structure, the multiscale modeling method of connecting microscopic finite element model to macro model is discussed, and a verifying example is given in which a precise microscopic finite element model is implanted into a macro structure model to form a multiscale model. In the end, the multiscale finite element analysis of a complex tall building structure is carried out under seismic wave, the results show that the analysis do not obviously increase the consumed resource but provides more reasonable and detailed information of the structure, which provides evidences for structure design.

**Key words:** finite element; elasto-plastic time history analysis; multiscale calculation; structure design

随着我国经济的迅速发展,对建筑结构的性能要求日趋复杂,外观要求也更加苛刻,这给工程结构设计带来了巨大的挑战。结构工程的设计分析也经历一个迅速发展的阶段。一些新的结构形式和结构设计理念不断提出。精细化分析、精细化设计是目前的发展趋势。对于大型的结构一般采用杆系模型、壳、墙等宏观模型分析结构的整体性能,但是这些模型不能准确模拟结构局部细节的信息,如复杂构件局部应力分布、节点半刚性、节点破坏形态等。对大型结构进行整体精细化实体建模分析,由于计算机条

件限制且工作量巨大,是不现实的。因此对关键的构件局部和节点的分析,通常的处理方法是将其从宏观模型中取出,单独进行精细化的有限元分析,考虑更多的结构细节,如考虑接触、材料非线性等,为结构设计提供依据。然而,这种二次分析难以准确确定局部模型的边界条件及其具体的加载形式,而不同的边界条件对分析的结果影响很大,给判断分析结果带来困难<sup>[1-2]</sup>。而且在往复荷载的作用下,难以判断局部模型的最不利工况,需要进行多次不同工况组合下的分析。

收稿日期: 2012-09-10.

作者简介: 黄银燊(1981-),男,高级工程师 E-mail: iseeku2000@126.com.

而在统一的模型下进行结构的多尺度建模计算为上述问题的解决提供了有效的解决方案<sup>[3-4]</sup>。多尺度计算的应用领域非常广泛,而对于工程结构而言,多尺度主要考虑采用宏观与微观模型相结合的模型,兼顾整体和细部,目前在大跨度桥梁结构分析中应用较多。对于大型结构整体而言,其单元尺寸往往在  $10^1$  m 级,而对于细部而言,其特征单元尺寸一般在 mm 级。结构的多尺度模型首要问题就是解决不同量级尺度下模型的联接问题,使整体结构的分析和局部细节的分析同步进行,并且考虑到结构材料的局部微细观尺度上的损伤演化与整体结构之间的相互影响。

本文探讨了在 ANSYS 软件中进行了结构多尺度建模计算的方法,验证了微观模型和宏观模型之间联接的准确性,并在一复杂超限高层组合结构的设计中进行了包括复杂节点微观模型和整体结构模型的多尺度弹塑性时程分析。计算结果表明,多尺度模型可以更准确地模拟结构热点部位的受力情况,为设计人员对结构性能的把握提供更加丰富的信息。

## 1 多尺度有限元建模

### 1.1 界面联接方式

从工程结构设计角度出发,多尺度建模首先需要根据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。图 1 为精细模型与宏观模型的联接示意图。实际工程中常见的模型组合包括:梁单元与实体(壳)单元联接、壳单元与实体单元联接等<sup>[5]</sup>。由于不同单元模型采用的力学简化和假设不同,故需要在不同精度模型之间采取适当的联接方式,达到力的平衡和变形的协调,并且尽量不造成对模型的过分约束。以精细模型为实体单元、宏观模型为壳单元的联接来讲(剖面如图 1),恰当的联接方式应该是,变形后的实体单元和壳单元交界面上各点位移贴合,但是在交界面上各点位移沿平行于该面方向的分量则不能一致。模型界面间转动自由度的传递按照平截面假定。其位移协调条件可以表示为:

$$x_2 = x_2', y_2 = y_2', x_1' = x_2' + \theta_2 \cdot t/2, y_1' = y_2' + \theta_2 \cdot t/2.$$

其中  $\theta_2$  为  $\theta_2$  点的转角,  $t$  为单元厚度。

ANSYS 中提供了多种方式进行不同精度单元之间的联接。一种简单的方式是,在局部坐标系下将上述条件直接写成约束方程形式;另外一种方式是对界面处适当的自由度建立刚性联接( REB2 ),

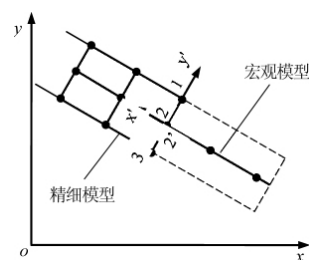


图1 不同尺度模型联接

在界面区域自动形成约束方程,从节点的位移与主节点始终保持一致,但会导致刚度的增加。上述两种方式可用于小变形分析。对于大变形问题,ANSYS 中提供用多点约束( MPC) 方法来进行各不同精度模型的耦合,即用接触算法来模拟体耦合。这种方法能更好地模拟真实情况,而且使用范围更广。MPC 方法可以克服传统接触算法和 ANSYS 中的其他多点约束工具的缺点,不需要输入接触刚度。对于小变形问题,它代表真实的线性接触行为,求解系统方程时不需要平衡迭代。对于大变形问题, MPC 方程在每个平衡迭代中不断进行更新,克服了小应变的限制条件。在实际工程中应根据分析目的、模型复杂程度和计算代价等条件选择适当的约束方法。

### 1.2 联接方法算例

在 ANSYS 软件中用一个长度为 3 m 的悬臂矩形钢梁模型的压弯加载算例验证了上述多尺度建模方法的可行性。矩形钢管梁截面高度为 500 mm,宽度 350 mm,钢管壁厚为 10 mm。材料应力应变关系采用双折线模型,初始弹性模量为 200 GPa,屈服后硬化模量为 3 GPa。建立了 4 个有限元模型(如图 2): A 模型全部采用壳单元 shell181; B 模型和 C 模型均采用多尺度模型,多尺度模型一段采用壳单元 shell181,另一段采用梁单元 Beam189,界面位置不同( B 和 C 的梁单元分别长 0.6 m 和 1.5 m ),并采

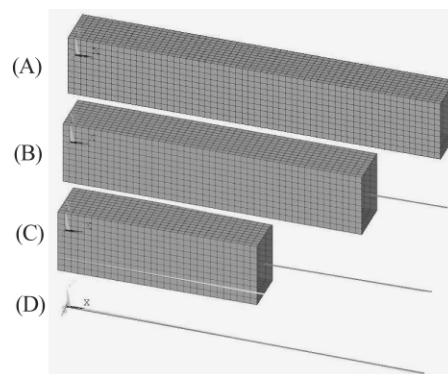


图2 验证模型

用 MPC 多点约束界面联接方法; D 模型全部采用梁单元 Beam189 建模。

加载过程如下:首先在悬臂端沿轴向施加恒定轴压力 20 kN,然后在垂直于梁轴线方向施加竖向荷载  $P$ 。得到  $P$ (竖向荷载)— $\Delta$ (顶点位移)曲线,如图 3 所示。可见 A、B、C 三种模型曲线基本完全吻合,而 D 模型荷载偏小,但结果相差在 3% 以内,对于工程分析可以忽略。图 4 给出了各模型的等效应力云图,可以看出,多尺度模型 B 和 C 壳单元部分的应力分布与 A 模型吻合较好,在联接处没有出现应力集中情况,且保持了变形的协调。仍然采用上述模型,进一步进行了弹塑性动力分析验证。在悬臂梁的端部添加质量,并考虑钢梁自身重量,体系阻尼比 0.04。输入单向 El Centro NS 地震波,分析得到各模型的悬臂端位移反应( $\Delta$ )时程曲线,如图 5 所示,并与理论计算结果进行了比较。可见各模型的位移反应时程曲线吻合亦令人满意,位移反应最大值相差在 3% 以内。

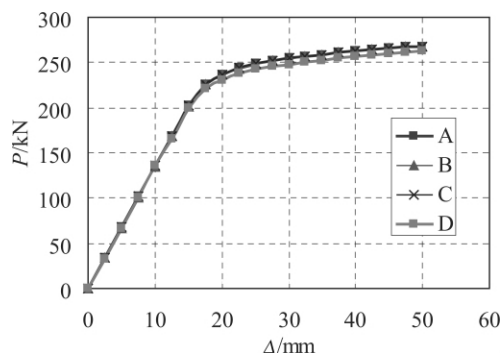


图3  $P-\Delta$  曲线

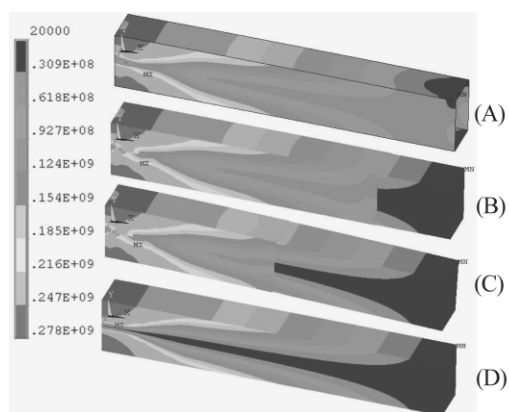


图4 等效应力/Pa

## 2 工程应用

在实际工程结构整体分析中,大多采用基于梁、壳、墙模型等宏观模型进行整体结构非线性有限元计算。采用梁单元建立的模型,在节点部位被简化

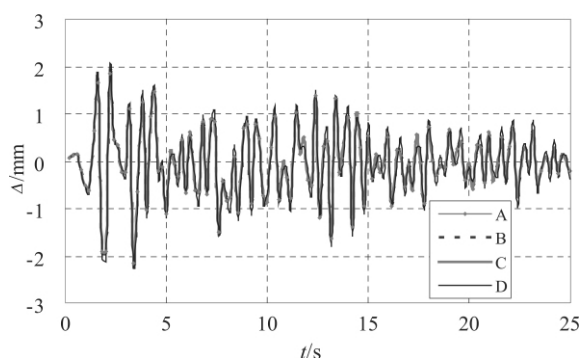


图5 动力分析结果比较

为刚性,结构的破坏主要体现为梁柱构件的塑性铰,而实际上节点本身的破坏在震害中并不少见,“强柱弱梁、节点更强”的设计往往难以实现,且不能经受实际地震的考验<sup>[6]</sup>。一般来说,节点部位构造复杂,采用常规的计算方法难以准确得到应力分布、破坏形态等。为了解决上述问题,在一复杂超限连体高层结构设计中,对多个关键节点和热点部位采用实体单元或壳单元精细建模,并进行了弹塑性动力时程分析。

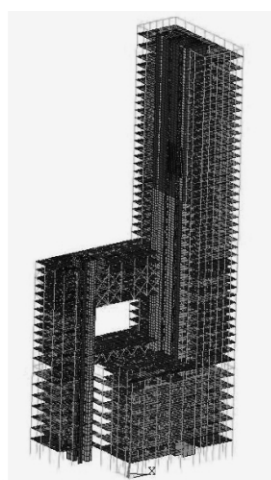
### 2.1 结构模型

该结构为由两栋高度不同的塔楼组成的高位连体复杂高层结构,高层塔楼均采用“圆钢管混凝土柱+H型钢梁或钢桁架+钢筋混凝土核心筒”结构,连接体采用钢桁架结构。结构主楼和副楼混凝土核心筒均偏置。本结构同时具有扭转不规则、凹凸不规则、局部夹层、楼板不连续、部分楼层刚度突变、部分楼层承载力突变等超限内容。结构总层数 46 层,总高度约 210 m,整体模型如图 6(a) 所示。

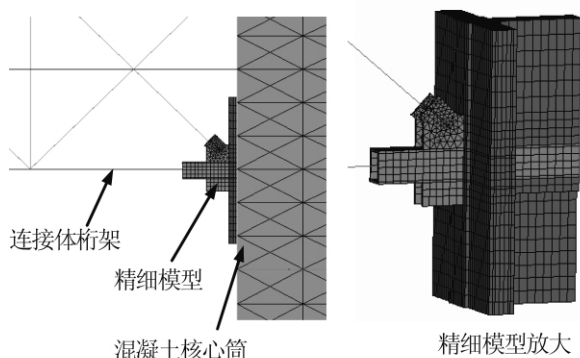
连接体桁架设计是本工程设计的关键,而其中节点的构造和处理尤为重要。连接体弦杆在多种工况组合下为压弯或拉弯构件,采用方箱型截面,截面尺寸均为 500 mm,最大板厚 40 mm。腹杆均采用倒置的 H 型钢,高度为 500 mm,翼缘宽度 500—700 mm,最大板厚 60 mm。钢材选用 Q345GJC。在节点中,杆件轴力通过翼缘直接传至节点板,各轴力汇交于节点板取得平衡。本文选取其中构造最复杂的两个关键节点进行了多尺度的有限元分析。

节点 1 为连接体主钢桁架下端与主楼筒体墙体连接部位,桁架弦杆延伸入剪力墙筒体内,墙内设有钢骨柱,如图 6(b) 所示。节点 2 为连体主桁架中部一复杂钢节点,如图 6(c) 所示。整体模型中用 Beam188 和 Beam189 单元模拟结构杆件,用 shell181 单元模拟墙体,shell63 单元模拟楼板;精细模型中,节点 1 采用实体单元模拟钢构件和混凝土,

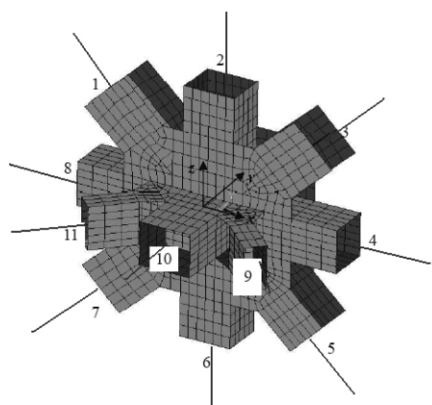
节点 2 采用弹塑性壳单元模拟钢板,并植入整体模型中。



(a)整体结构模型



(b)节点1(实体单元)



(c)节点2

图 6 多尺度结构模型

## 2.2 分析结果

本文共进行了两条天然波和一条人工波的大震工况的分析,采用了精细模型分析,时间稍有增加。图 7 为节点 1 某时刻的混凝土竖向应力云图。由图 7 可见,混凝土在与加劲板接触处压应力较大,纵向应力超过设计强度,此处混凝土应该合理设计。另外可以发现,节点处钢材在大震下均未进入塑性状

态,但是连接钢板转角处局部应力水平偏高。

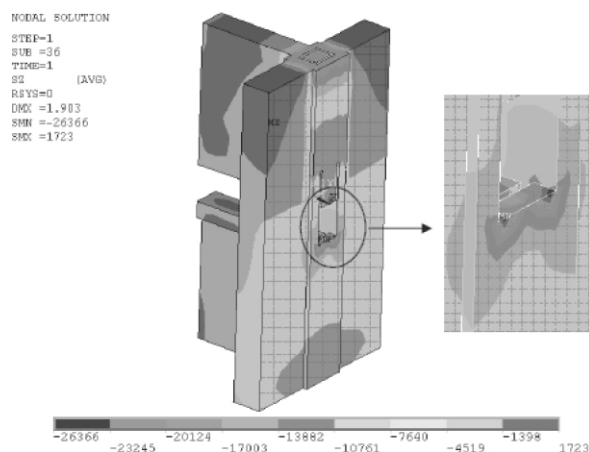


图 7 节点 1 混凝土竖向应力云图(kPa)

图 8 给出了节点 2 应力较大时的应力应变图。分析表明,在大震作用下整个节点大部分都处在较低的应力水平下,而只在某些小范围局部应力较高,甚至进入塑性,但这种局部高应力范围较小,会随着施工焊接的影响而缓解,或者通过应力重分布而缓解,对结构整体的影响不大。

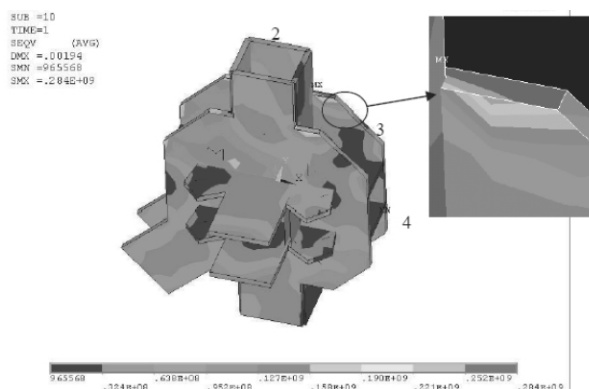


图 8 节点 2 Mises 应力(Pa)

图 9 给出了节点 2 的 5 号杆件在整体模型和精细模型在各时刻的杆件内力对比。由图 9 可见,两

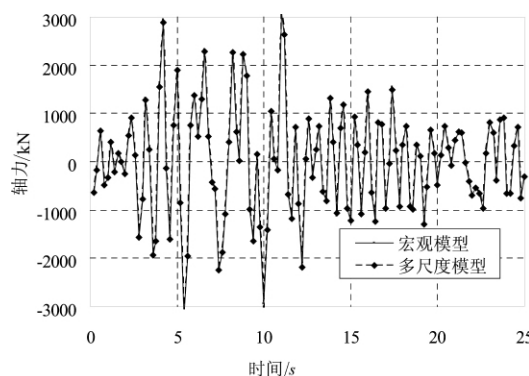


图 9 节点 5 号杆件 2 两种模型杆件轴力时程比较  
(下转第 81 页)

表5 试验段路面结构

路面结构层	直线段	曲线段
上面层	6 cm 沥青玛蹄脂碎石(SMA)	4 cm SMA + 2 cm OGFC
应力吸收层	2 cm 应力吸收层	2 cm 应力吸收层
上基层	28 cm 水泥混凝土板	28 cm 水泥混凝土板
防水联接层	1.5 cm 防水联接层	1.5 cm 防水联接层
基层	40 cm 水泥稳定碎石	40 cm 水泥稳定碎石
底基层	20 cm 低剂量水泥稳定碎石	20 cm 低剂量水泥稳定碎石

大中修,两种路面结构经济性比较的具体结论需要长期观测和记录方能得出。

#### 4 结束语

本文提出了“刚基优面”的设计思想,为路面设计提供了新思路。并以之为指导,设计了多功能长效路面结构,充分发挥了刚、柔两种路面的优点,为

长寿路面设计提供了一种新的路面结构型式。并以武汉市天河机场第二通道工程为依托工程,来验证本观点的可行性。但实现长效性的路面结构型式不只有一种,今后在理论研究与实践探索中,还应丰富多种长效路面类型形式。

#### 参考文献:

- [1] 孙志林,黄晓明.永久性沥青路面研究综述[J].华中科技大学(城市科学版),2007,24(3):49-52.
- [2] Asphalt Pavement Alliance. Perpetual Pavements Synthesis [Z], Asphalt Pavement Alliance Order Number APA 1011/02,2002.
- [3] 杨太钦.PCC-AC复合式路面典型结构研究[D].南宁:广西大学,2008.
- [4] 袁谱,王端宜.长寿命沥青路面结构参数变化的三维有限元分析[J].广东公路交通,2006(2):1-4.
- [5] 湖北省交通规划设计院,武汉市公路勘察设计院.武汉天河机场第二通道初步设计说明[R].2009.8.

(上接第76页)个模型计算出的杆件轴力基本上完全吻合,因为对于多尺度的精细模型来说,节点的边界条件在各个时刻和各个工况下都是天然满足的。采用精细化的模型可以更精确地得到各个时刻的节点应力分布,为节点的设计提供有力依据。

#### 4 结论

3.1 在ANSYS中验证了不同尺度之间单元的联接方式,表明可以实现不同尺度模型间的联接过渡,误差均在工程可接受范围之内。

3.2 在一复杂混合高层结构分析中进行了结构多尺度计算,通过不同尺度单元间的协同,实现了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地模拟节点的实际受力情况。

3.3 多尺度有限元计算方法可以在可接受的计算资源和计算时间下,既反应结构的整体性能,又反映结构的局部信息,在结构设计的领域有着较好的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 郑伯兴,黄长华.钢管相贯节点疑难问题分析及对策探讨[J].钢结构,2007,22(9):91-94.
- [2] 陈其业,梁乃刚.多分支管节点的有限元分析[A].见:中国钢结构协会海洋钢结构专业委员会,第一次学术交流论文集.1985.
- [3] 吴佰建,李兆霞,汤可可.大型土木结构多尺度模拟与损伤分析——从材料多尺度到结构多尺度力学[J].力学进展,2007,37(3):321-336.
- [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(城市科学版),2008,25(4):76-80.
- [5] 王勖成,邵敏.有限元方法基本原理与数值方法[M].北京:清华大学出版社,1988年.
- [6] 夏珊,刘爱文.汶川地震框架柱震害的初步分析[J].震灾防御技术,2008,3(3):237-242.