

文章编号:1673-2049(2014)02-0020-06

钢筋混凝土结构多尺度建模与数值分析

李宏男,王大东

(大连理工大学 建设工程学部,辽宁 大连 116024)

摘要:采用通用有限元软件 ABAQUS 实现了精细单元与粗糙单元之间的界面耦合及变形协调,并通过算例验证了结构多尺度有限元分析方法的有效性和精确性。基于多尺度方法,结合纤维模型子程序与混凝土塑性损伤模型,对钢筋混凝土框架结构进行多尺度建模,并进行了弹塑性时程分析及局部构件损伤分析。结果表明:对于大型结构或复杂结构来说,多尺度计算可较好地模拟局部构件的复杂边界条件,为大型工程结构进行多尺度计算提供参考。

关键词:多尺度方法;有限元模型;界面耦合;弹塑性时程分析;损伤分析

中图分类号:TU311.41

文献标志码:A

Multi-scale Finite Element Modeling and Numerical Analysis of Reinforced Concrete Structure

LI Hong-nan, WANG Da-dong

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: To accomplish a reliable interfacial coupling between refined element and coarse element, a method was proposed by using general finite element software ABAQUS. Meanwhile, two simple models were calculated to verify the effectiveness and accuracy of the multi-scale finite element analysis method of the structures. Based on multi-scale method, the elasto-plastic time history analysis and local member's damage analysis of a reinforced concrete (RC) frame structure were carried out through a fiber model subroutine and concrete plastic damage model. The results show that for the large structures or complicated structures, the problem of complex boundary conditions of local members can be solved efficiently. It can provide reference to the multi-scale calculation of the large scale engineering structures.

Key words: multi-scale method; finite element model; interfacial coupling; elastic-plastic time history analysis; damage analysis

0 引言

多尺度科学是一门研究不同尺度之间相互耦合现象的科学,可以定义为:物质(或事物)的尺度(或规模等)对其某种作用、效应或性质的一种影响关系^[1]。多尺度方法在众多领域中得到了广泛应用,

而在有限元分析中,无论是不同类型的单元还是同类型不同尺度的单元,对同一个模型分析时,都会产生这种效应。对于结构多尺度有限元分析,常采用不同类型和尺度的单元来模拟结构的不同部分,如梁单元和壳单元可以用来模拟尺度较大的构件(梁、柱、墙、板等),实体单元则可以用来模拟尺度较小的

收稿日期:2014-04-07

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2011CB013605),国家自然科学基金重大国际合作项目(51261120375);国家自然科学基金创新研究群体基金项目(51121005)

作者简介:李宏男(1957-),男,辽宁沈阳人,教授,博士研究生导师,工学博士,博士后,E-mail:hnli@dlut.edu.cn。

细部构件或关键构件(节点等)。在同一模型中,当采用不同类型的单元模拟不同尺度的构件时,需要建立不同单元之间合理的连接方式,使得各种单元可以协同工作。

在结构多尺度有限元分析领域内,各国研究者对多尺度计算进行了初步的研究探索和实践,Dhia 等^[2-3]利用 ARLEQUIN 方法耦合 2 种不同的力学模型,在耦合区域内 2 种模型进行能量分配并通过耦合算子进行耦合;Rannou 等^[4-5]基于 XFEM 和全局多重网格法对结构进行裂纹扩展分析,并对一个简单的结构进行三维疲劳裂纹扩展的多尺度分析;李兆霞等^[6-7]基于多点约束提出大跨桥梁结构动力响应和损伤累计的多尺度数值模拟方法,同时考虑了焊接构件在焊接的局部劣化以及局部劣化对桥梁整体结构的影响;林旭川等^[8]探讨了有限元微观单元与宏观单元的界面连接方法,通过通用有限元软件 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。乔华等^[9]采用 ARLEQUIN 方法与扩展有限元法相结合进行结构的多尺度数值模拟,基于 MATLAB 软件编制了多尺度分析程序,并对一中心带圆孔的方板在受水平均布拉力作用下的孔口应力集中问题进行了分析。由上述可知,目前对于混凝土这类本构关系复杂的复合材料进行的结构多尺度有限元分析仍较少。

本文中笔者通过通用有限元软件 ABAQUS 中 Couple 功能,利用参照点来约束耦合面上的耦合点,实现不同尺度模型之间的变形协调。基于上述思想,对一悬臂梁结构进行了多尺度数值模拟分析。通过对自由度的耦合来实现不同尺度单元间的协同工作,完成了局部精细模型和整体结构模型相结合的多尺度计算。结果表明,多尺度有限元分析可以保证计算效率,而且能够准确地模拟局部构件的受力情况。在平面框架多尺度弹塑性时程分析中,多尺度分析不仅可以准确模拟整体结构的力学性能,更能有效地模拟局部精细单元的塑性发展、损伤分析等过程。

1 模拟方法及算例分析

1.1 多尺度数值建模方法

由于不同单元类型节点的自由度和精度不同,当在一个模型中采用不同的单元来模拟结构或构件的不同部分时,不同尺度单元间的界面连接将是保证整个模型能够运行的最关键步骤。界面连接关系

到单元之间的变形协调,从而直接影响模型分析结果的准确性。下面以二维梁单元与实体单元的耦合为例,简单介绍界面连接的原理与方法,空间三维单元的界面耦合原理与二维单元类似。

图 1 为多尺度模型耦合示意。图 1 中,以梁单元节点为参考点,实体单元约束面上的各节点为耦合点,通过 Kinematic Coupling 连接来实现耦合。基本原理为:约束区域视为刚性,此区域上的各节点之间的距离保持不变,各节点与参考点的距离保持不变。在图 1 中局部坐标系下,以梁单元的节点 B 为原点, x 轴平行于梁单元的梁轴线, y 轴垂直于梁轴线,各节点位移变化满足如下规律

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

$$y_{A_i} = y_B \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: x_{A_i} 为约束面上各节点在局部坐标系下 x 方向的位移; y_{A_i} 、 y_B 分别为约束面上各节点在局部坐标系下 y 方向的位移和梁单元节点 B 在 y 方向的位移。

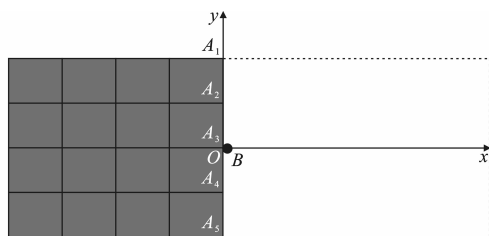


图 1 多尺度模型耦合示意

Fig. 1 Coupling Schematic of Multi-scale Model

1.2 混凝土结构的模拟

在进行混凝土结构多尺度有限元分析时,因为选取不同的单元模拟混凝土,所以在钢筋模拟、混凝土本构模型选择的问题上均有所差异。

本文中的钢筋混凝土有限元模型通过以下方式进行模拟:混凝土精细单元采用八节点三维实体缩减积分单元 C3D8R;混凝土粗糙单元采用 B31 梁单元模型。实体单元中利用 Embedded 命令,将钢筋嵌入到混凝土中。梁单元中的钢筋处理稍复杂:通过相同类型梁单元叠加的等效模拟方法来实现截面配筋。利用 * Elcopy 命令将钢筋、混凝土分为 2 个相同类型的梁单元,然后让这些梁单元共用节点。由于梁单元类型相同,梁单元共用节点,可以保证梁单元中任意点位移协调与平截面假定成立,从而实现模型的等效模拟。

梁单元混凝土本构模型结合通用有限元软件 ABAQUS 的隐式算法,利用潘鹏等提供的基于纤维模型的钢筋与混凝土的材料子程序 PQ-Fiber 进行模拟。混凝土本构关系根据混凝土规范的混凝土

骨架曲线定义,输出的状态变量包括受压残余应变(卸载至应力为 0 时的压应变)、卸载/再加载刚度、截面的屈服状态等。

混凝土实体单元选取混凝土塑性损伤本构模型,对于应力硬化,在 ABAQUS 中提供 2 种定义方法:基于应力-应变的行为和断裂能的行为。经过计算发现,采用应力-应变行为具有更好的收敛性和控制性。应力-应变关系按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)来模拟,该模型中受拉、受压损伤因子 d_c, d_t 的计算公式分别为

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_0^{-1}}{\epsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_0^{-1}} \tag{3}$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_0^{-1}}{\epsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_0^{-1}} \tag{4}$$

式中: $\epsilon_c^{pl}, \epsilon_t^{pl}$ 分别为受压、受拉阶段塑性应变; σ_c, σ_t 分别为压应力和拉应力; b_c, b_t 分别为单轴受压、受拉情况下塑性应变与非弹性应变的比值,根据试验数据取值,由循环荷载卸载再加载应力路径来标定,此处分别取为 0.7, 0.1^[10]。

1.3 算例分析

以某一钢筋混凝土悬臂梁为分析对象,其截面尺寸为 0.5 m×0.5 m,梁长为 4 m,分别在自由端施加线性动荷载及不规则的震荡荷载。混凝土构件多尺度模型如图 2 所示,取局部精细区域内节点 1 和节点 2 的混凝土应力以及自由端位移为参考值进行比较,以此来验证这种多尺度分析的精确性。

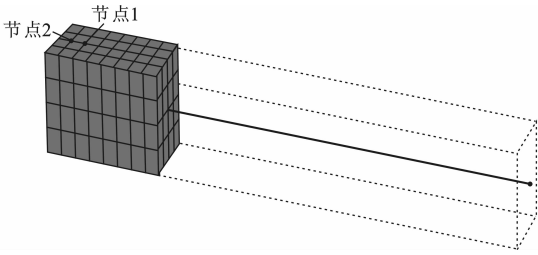


图 2 混凝土构件多尺度模型

Fig. 2 Multi-scale Model of Concrete Member

图 3,4 分别为 3 种模型在线性动荷载下节点 1 和节点 2 正应力时程曲线。由图 3,4 可知,多尺度模型时程曲线变化趋势与精细尺度模型非常接近,应力达到屈服时间以及屈服应力的值几乎相等。图 5,6 分别为不规则荷载下 3 种模型正应力时程曲线与自由端纵向位移时程曲线。由图 5,6 可以看出:多尺度模型整体的曲线变化与精细尺度模型差距并不大;各模型时程曲线变化趋势基本一致,多尺度模型上各节点的值与精细尺度模型上节点的更为接近。从结构多尺度分析的目的来看,本文中

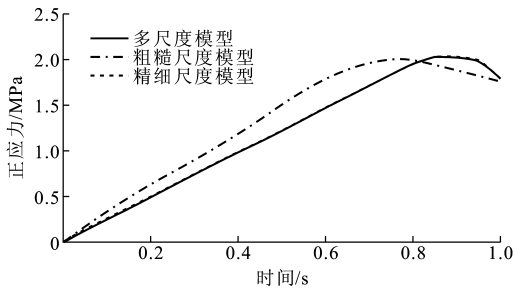


图 3 线性动荷载下节点 1 正应力时程曲线

Fig. 3 Normal Stress Time History Curves of Node 1 Under Linear Dynamic Load

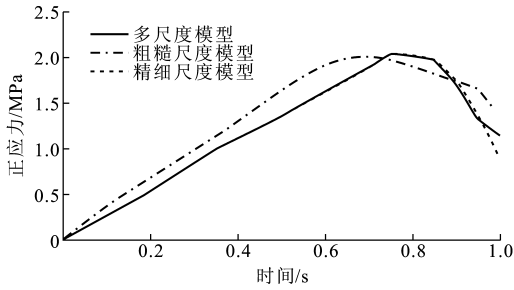


图 4 线性动荷载下节点 2 正应力时程曲线

Fig. 4 Normal Stress Time History Curves of Node 2 Under Linear Dynamic Load

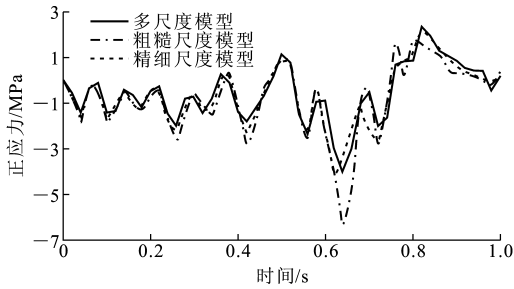


图 5 不规则荷载下节点 1 正应力时程曲线

Fig. 5 Normal Stress Time History Curves of Node 1 Under Abnormal Dynamic Load

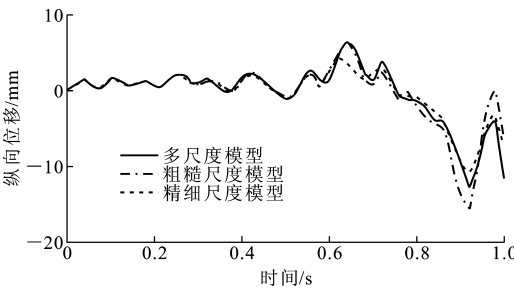


图 6 不规则荷载下自由端纵向位移时程曲线

Fig. 6 Longitudinal Displacement Time History Curves of Free End Under Abnormal Dynamic Load

的耦合方法保证了关键构件或部位的计算精度。表 1 中给出了各模型分析过程的计算时间。由表 1 可知,在线性动荷载与震荡荷载作用下,多尺度模型

表 1 各模型的计算时间
Tab. 1 Computational Time of Models

荷载类型	计算时间/s			R/%
	粗糙尺度模型	精细尺度模型	多尺度模型	
线性动荷载	80.4	231.7	124.0	46
震荡荷载	633.3	1 789.6	1 332.5	26

注:R 为多尺度模型计算时间相对精细尺度模型减小的百分比。
的计算时间相对精细尺度模型分别减少了 46% 和 26%。综上可知,该方法提供了有限元分析精度和计算效率之间的一种平衡,多尺度模型可以较为准确地模拟局部构件的受力情况,从而更有效地把握局部构件和整个结构的性能。

2 框架结构多尺度弹塑性时程分析

2.1 模型参数的选取

本文中参考常见的钢筋混凝土框架的结构布局,选择四层三跨的钢筋混凝土平面框架为研究对象,框架的具体尺寸为:混凝土柱为 450 mm×450 mm,梁截面为 600 mm×300 mm,底层高为 4.2 m,其余各层高度均为 3.6 m,跨度分别为 7.2, 2.4, 7.2 m,混凝土强度等级为 C30,钢材强度为 HRB335,模拟方法如第 1 节所述。所选用地震波为 El Centro 波,输入波形见图 7,加载步为 1 000 步,时间间隔为 0.02 s,时间总长为 20 s。需要说明的是,对于大型工程结构来说,将整个结构完全用精细单元模拟不仅是计算条件不允许的,更是对计算资源的一种浪费,因此只考虑粗糙尺度模型和多尺度模型。

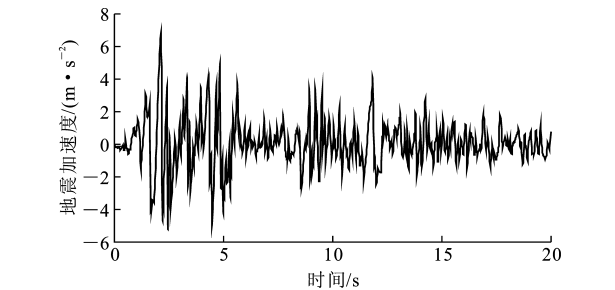


图 7 El Centro 波
Fig. 7 El Centro Seismic Waves

2.2 过程分析

建立粗糙单元模型后,通过屈服面的分布状态云图以及等效塑性应变云图变化,确定容易发生破坏的构件或对整体结构性能影响较大的构件位置。图 8 为框架顶层负方向最大水平位移时刻($t=2.18\text{ s}$)与正方向最大水平位移时刻($t=12.24\text{ s}$)的屈服面分布状态云图,图 8 中虚线圈出的部分为屈

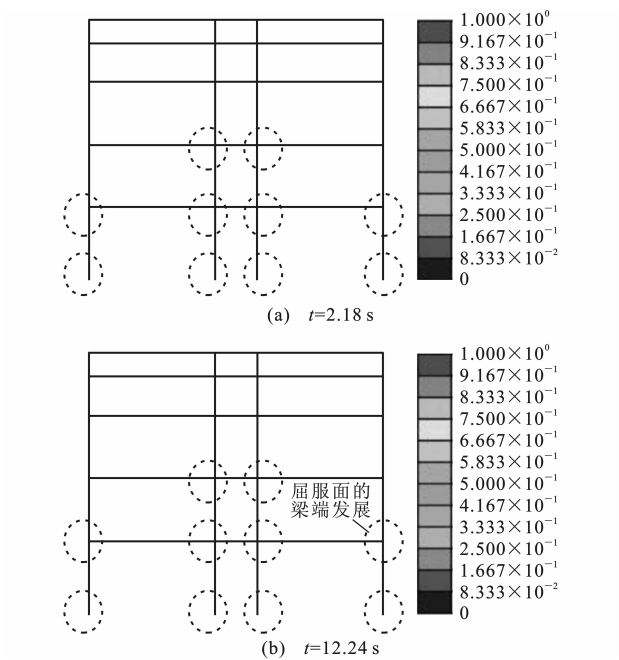


图 8 屈服面分布状态云图
Fig. 8 Clouds of Yield Surface Distribution

服面的分布情况,此处屈服面的输出值为 1,即截面的屈服表现为钢筋受拉屈服(输出值为-1 表示混凝土压碎,输出值为 0 表示未屈服)。从图 8 可以看出, $t=2.18,12.24\text{ s}$ 变化过程中结构屈服面分布情况并未产生太大变化,框架最右侧边节点处屈服面向梁端延伸,变化主要为屈服面内材料塑性的发展,所以图 8 中无法充分体现。考虑到钢筋的塑性性能发展,仅以钢筋屈服的截面来判断破坏构件显然是过于保守的。图 9 为 $t=2.18,12.24\text{ s}$ 这 2 个时刻等效塑性应变云图,图 9 中虚线圈出的部分为等效塑性应变较大的截面,其中的数值为节点区域内等效塑性应变最大值,由此可确定该结构的精细尺度构件位置为第 1 层中间 2 个节点,建立多尺度模型并进行分析,将左侧节点作为节点 1,右侧节点作为节点 2。

由以上分析过程可确定,第 1 层中间 2 个节点为关键构件,钢筋混凝土框架多尺度模型如图 10 所示。结合混凝土塑性损伤本构的特点,即拉力作用下的开裂失效和压力作用下的压碎 2 个失效机制,对局部精细尺度模型进行分析。图 11 为 2 种模型框架顶层相对位移对比,2 种模型框架顶层位移的变化趋势基本一致,这也在一定程度上验证了多尺度方法的精确性。图 12,13 分别给出了节点 1 在多尺度框架顶层负方向最大水平位移时刻($t=2.28\text{ s}$)与正方向最大水平位移时刻($t=5.16\text{ s}$)的受拉和受压损伤云图(由于节点 2 的分析方法与之相同,此

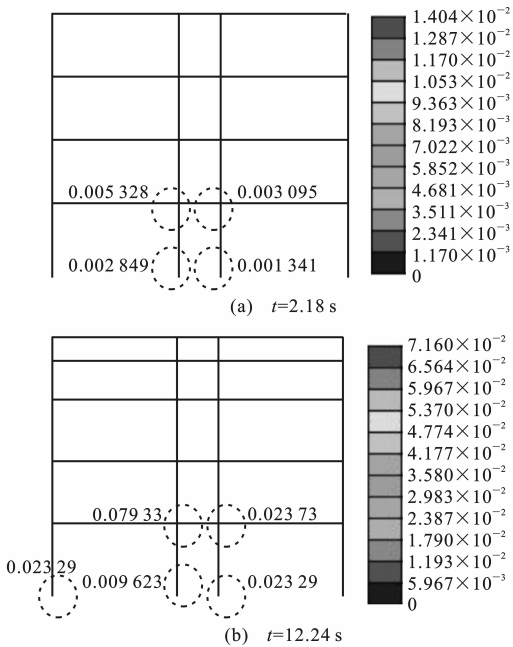


图 9 等效塑性应变云图

Fig. 9 Clouds of Equivalent Plastic Strain

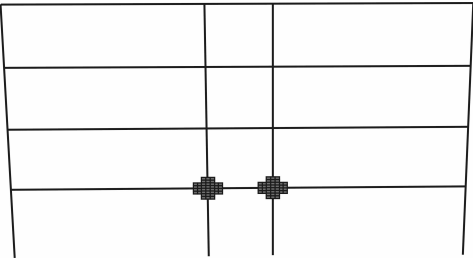


图 10 钢筋混凝土框架多尺度模型

Fig. 10 Multi-scale Model of Reinforced Concrete Frame

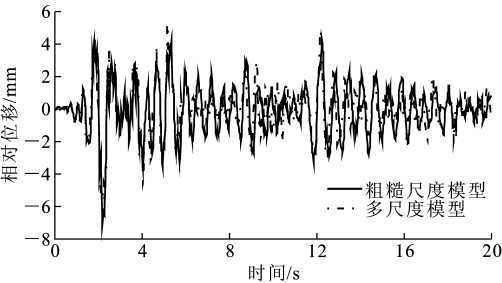


图 11 2 种模型顶层相对位移对比

Fig. 11 Comparisons of Relative Top Displacements of Two Models

处不再赘述),以此来判断混凝土损伤的状态。由图 12(a)可以看出,受拉损伤因子偏大且集中的区域主要为梁的右边缘和柱的下边缘。图 14 为在 $t=2.28, 5.16$ s 时节点 1 最大主塑性应变方向。Lubliner 等^[11]提出,最大主塑性应变的方向与裂缝开展平面垂直,利用塑性损伤模型可以根据积分点处最大主塑性应变的方向来观察裂缝发展情况。图 13

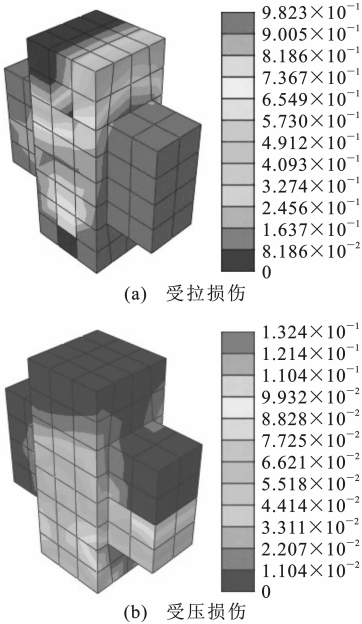


图 12 $t=2.28$ s 时节点 1 受拉、受压损伤云图

Fig. 12 Clouds of Tensile Damage and Compressive Damage of Node 1 when $t=2.28$ s

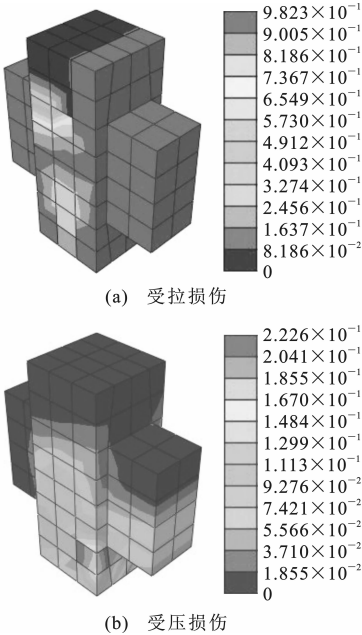


图 13 $t=5.16$ s 时节点 1 受拉、受压损伤云图

Fig. 13 Clouds of Tensile Damage and Compressive Damage of Node 1 when $t=5.16$ s

和图 14(b)基本说明了这 2 个时刻的区域塑性损伤与裂缝的继续发展。由于图 12 与图 13 中受压损伤因子值普遍低,认为该节点在此过程中没有压碎失效。

通过该算例可知,多尺度数值模拟可以较为准确地模拟整体结构的受力情况,而且能够直观有效地把握局部构件的性能,如损伤演变、裂缝发展等过程。

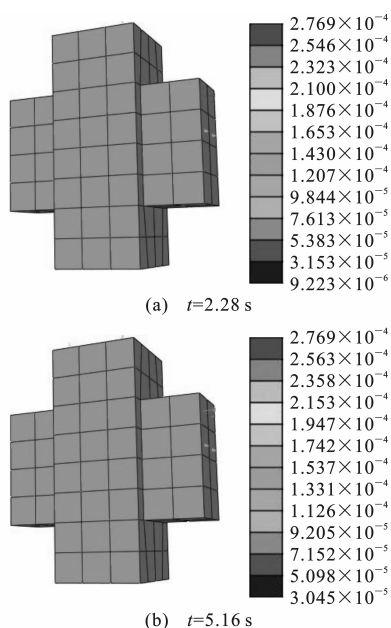


图 14 $t=2.28, 5.16\text{ s}$ 时节点 1 最大主塑性应变方向

Fig. 14 Symbols on Maximum Principal Plastic

Strain of Node 1 when $t=2.28, 5.16\text{ s}$

3 结 语

(1)通过通用有限元软件 ABAQUS 中 Couple 功能,利用参照点来约束耦合面上的耦合点,实现不同尺度模型之间的变形协调,通过不同的算例验证该方法的有效性和准确性。结果表明,该方法可有效实现不同尺度模型之间的变形协调,多尺度有限元分析可在不降低计算精度的前提下,提高了计算效率,是精度与计算效率之间的平衡。

(2)多尺度有限元分析可结合不同的本构模型,对混凝土结构进行分析。本文中结合纤维模型子程序与混凝土塑性损伤模型,以平面框架多尺度分析实例,在整体结构弹塑性时程分析中考察局部节点的受力性能,通过该方法对节点的损伤演变、裂缝方向等进行了分析。相对于单一的梁单元模型,该方法分析过程更为直观,可以更好地反映其材料开裂、屈服、失稳等局部非线性行为。多尺度计算可较好地模拟局部构件的复杂边界条件,为大型工程结构进行多尺度计算提供参考。

参考文献:

References:

- [1] GLIMM J, SHARP D V. Multi-scale Science; a Challenge for the Twenty-first Century[J]. Advances in Mechanics, 1998, 28(4): 545-550.
- [2] DHIA B D, RATEAU G. Application of the Arlequin Method to Some Structures with Defects[J]. Revue

Européenne des Éléments Finis, 2002, 11 (2/3/4): 291-304.

- [3] DHIA B D, RATEAU G. The Arlequin Method as a Flexible Engineering Design Tool[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2005, 62(11): 1442-1462.
- [4] RANNOU J, GRAVOUIL A, COMBESCURA A. A Multi-grid Extend Finite Element Method for Elastic Crack Growth Simulation[J]. European Journal of Computational Mechanics, 2007, 16(2): 161-182.
- [5] RANNOU J, GRAVOUIL A, BAIETTO-DUBOURG M C. A Local Multigrid X-FEM Strategy for 3-D Crack Propagation[J]. International Journal for Numerical Method in Engineering, 2008, 77(4): 581-600.
- [6] 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(2): 251-260.
- LI Zhao-xia, SUN Zheng-hua, GUO Li, et al. Concurrent Multi-scale Modeling of Structures and Damage Analyses[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(2): 251-260.
- [7] 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.
- SUN Zheng-hua, LI Zhao-xia, CHEN Hong-tian, et al. Multi-scale Finite Element Analysis Considering Local Details[J]. Special Structures, 2007, 24(1): 71-75.
- [8] 林旭川, 陆新征, 叶列平. 钢-混凝土混合框架结构多尺度分析及其建模方法[J]. 计算力学学报, 2010, 27(3): 469-475, 495.
- LIN Xu-chuan, LU Xin-zheng, YE Lie-ping. Multi-scale Finite Element Modeling and Its Application in the Analysis of a Steel-concrete Hybrid Frame[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2010, 27(3): 469-475, 495.
- [9] 乔华, 陈伟球. 基于 ARLEQUIN 方法和 XFEM 的结构多尺度模拟[J]. 工程力学, 2010, 27(增1): 29-33.
- QIAO Hua, CHEN Wei-qiu. Multi-scale Simulation of Structures Based on ARLEQUIN Method and XFEM[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(S1): 29-33.
- [10] 张战廷, 刘宇峰. ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型[J]. 建筑结构, 2011, 41(增2): 229-231.
- ZHANG Zhan-ting, LIU Yu-feng. Concrete Damaged Plasticity Model in ABAQUS[J]. Building Structure, 2011, 41(S2): 229-231.
- [11] LUBLINER J, OLIVER J, OLLER S, et al. A Plastic-damage Model for Concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-329.