

文章编号:1673-2049(2017)03-0016-08

钢筋混凝土柱动力滞回性能两尺度数值模拟

许斌,王治原,陈洪兵

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:为提高钢筋混凝土柱在快速循环加载下的动力滞回性能数值模拟计算效率并反映局部破坏特征,对通用有限元分析程序ABAQUS进行二次开发,编写了适用于三维纤维梁单元的混凝土和钢筋本构模型程序,在实现纤维梁单元和实体单元界面连接变形协调的基础上,建立了由三维实体单元和纤维梁单元组成的两尺度有限元模型。为了比较计算精度和效率,分别建立了试件的三维纤维梁单元模型和三维实体单元模型。分别对3种模型进行往复荷载作用下考虑混凝土材料应变率效应的钢筋混凝土柱动力滞回性能数值模拟,将两尺度模型的计算结果与试验结果进行比较。结果表明:所开发的材料本构模型程序以及两尺度模型能较好地反映钢筋混凝土柱在快速循环加载下的承载能力及滞回性能;所建立的两尺度模型既可节约计算成本,又能实现钢筋混凝土柱试件关键部位的精细化分析。

关键词:钢筋混凝土柱;动力滞回性能;ABAQUS二次开发;多尺度模型;数值模拟;应变率

中图分类号:TU323.1 文献标志码:A

Numerical Simulation on Dynamic Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Columns with Two-scale Model

XU Bin, WANG Zhi-yuan, CHEN Hong-bing

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to improve the simulation efficiency and investigate the local failure pattern of reinforced concrete (RC) column specimens under dynamic cyclic loadings, the subroutines describing the dynamic constitutive laws of concrete materials and reinforcement which were suitable for three dimensional (3D) fiber beam elements were developed in ABAQUS. Then, a two-scale finite element method (FEM) model composed of 3D fiber beam elements and 3D solid elements was established to simulate the dynamic cyclic behavior of the RC column specimens under cyclic loading. In the model, the deformation of the 3D fiber beam elements and the 3D solid elements at the interface was compatible. For comparison, two FEM models for the RC columns specimens composed of the fiber elements and solid elements solely were developed. The simulation results from the two-scale FEM model were compared with the test results firstly. The results show that the two-scale model using the developed subroutines describing the constitutive laws can simulate the load-carrying capacity and the dynamic hysteretic performance of the RC columns under rapid cyclic loading. The two-scale model can limit computation cost and achieve fine analysis of the RC column.

Key words: reinforced concrete column; dynamic hysteretic behavior; ABAQUS subroutine;

收稿日期:2016-11-27

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作研究与交流项目(51261120374)

作者简介:许斌(1972-),男,湖北孝感人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:binxu@hnu.edu.cn。

multi-scale model; numerical simulation; strain rate

0 引言

进入21世纪以来,中国正经历有史以来最大规模的基础设施建设。混凝土结构依然是最主要的形式。据统计,中国混凝土的工程用量在2001~2010年达到了人均每年5t的水平^[1]。众所周知,在地震等强动力荷载作用下,钢筋混凝土结构具有很强的非线性特点,进入弹塑性阶段。对复杂的钢筋混凝土结构进行非线性分析具有重要意义。

有限元技术在工程结构的非线性分析中发挥了重要作用。精细化分析与精细化设计也成为了结构设计新的要求。目前,用于大型土木工程结构的设计与分析的软件如SAP2000、PERFORM-3D等多采用杆和壳单元等宏观单元对结构的性能进行计算分析。在宏观单元模型中,直接采用杆件连接来模拟节点、梁柱端区域,虽然具有计算量小、耗时短的优势,但很难详细反映这些关键部位的受力特征及局部破坏过程。大型通用有限元软件ABAQUS具有强大的非线性分析能力,且其单元类型众多,其中基于材料模型的纤维梁单元可以模拟轴力及弯矩的耦合作用,计算精度高,但目前缺乏适用于三维模型的本构模型。三维实体单元虽可对复杂结构进行精细分析,但计算成本高,对大型复杂结构体系进行基于三维实体单元的整体精细化建模分析不太现实。历次震害分析也表明,结构在地震等强动力荷载作用下的破坏往往集中在某些局部,而在其他部位损伤较小^[2]。为实现计算分析的精细化与计算成本之间的平衡,多尺度成为一种新的解决方法,近年来在土木工程领域得到广泛重视^[3-6]。

多尺度计算主要采用尺度分离的思想方法^[7-8]: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,采用宏观单元与微观或者细观单元相结合的模型,兼顾整体与局部。通过合适的连接,使整个模型协同分析计算,从而更好地把握整体结构的受力性能和局部关键部位的破坏过程。

本文基于通用有限元软件ABAQUS,利用其三维纤维梁单元和实体单元建立了钢筋混凝土柱两尺度模型,并基于ABAQUS的二次开发接口,编写了适用于三维纤维梁单元的材料本构子程序,实现了钢筋混凝土柱在快速循环加载下动力性能的两尺度模拟。分别对纤维梁模型、实体单元模型以及实体单元与纤维梁两尺度模型进行数值模拟,并与试验

结果进行比较,验证了建立的两尺度模型在描述局部破坏特征和提高计算效率方面的有效性。

1 材料本构关系

1.1 纤维钢筋的本构模型

通过对钢筋滞回特性的分析,考虑到编程的方便,本文对Clough^[9]建议的钢筋双线性本构模型进行适当修改,如图1所示。考虑钢材的鲍辛格效应,反向加载曲线指向历史最大变形点。图1中,σ为应力,ε为应变, f_y 为钢筋的屈服强度, E_0 为钢筋的初始弹性模量, f_{max} 为加载历史所经历的最大应力, α, λ 均为系数。

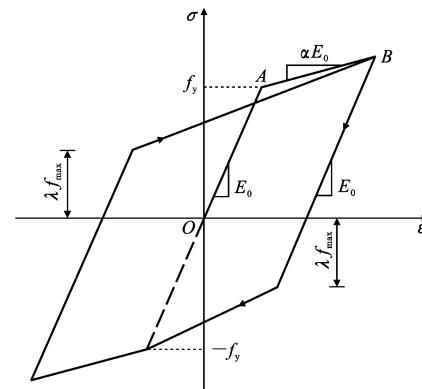


图1 梁单元钢筋本构模型

Fig. 1 Constitutive Model of Steel for Beam Element

骨架曲线由弹性段(OA)和强化段(AB)组成,强化段弹性模量为 αE_0 ,本文 α 取值为 0.04。若钢材在强化段(AB)进行卸载,卸载至应力为 0 反向再加载时,并不直接指向该方向加载历史上所经历的最大点(ϵ_{max}, f_{max}),而是先按卸载刚度加载至历史最大点对应应力的 λ 倍,即 λf_{max} ,再指向历史最大点,即强化段的起点由系数 λ 确定,本文 λ 取值为 0.3。

1.2 纤维混凝土本构模型

本文选择的纤维混凝土单轴本构模型与弹塑性分析软件OpenSees中的Concrete02模型类似^[10],其拉压曲线如图2所示,其中, E_c 为初始切线刚度, E_{cu}, E_r 均为再加载刚度, E_t 为混凝土受拉软化刚度, ϵ_{re} 为残余应变, ϵ_r 为R点应变, σ_r 为R点应力。该模型受压骨架曲线公式为

$$\sigma_c = \begin{cases} f_{c0} \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}} (2 - \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c0}}) & 0 < \epsilon_c \leq \epsilon_{c0} \\ f_{c0} + \frac{f_{cu} - f_{c0}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{c0}} (\epsilon_c - \epsilon_{c0}) & \epsilon_{c0} < \epsilon_c \leq \epsilon_{cu} \\ f_{cu} & \epsilon_c > \epsilon_{cu} \end{cases} \quad (1)$$

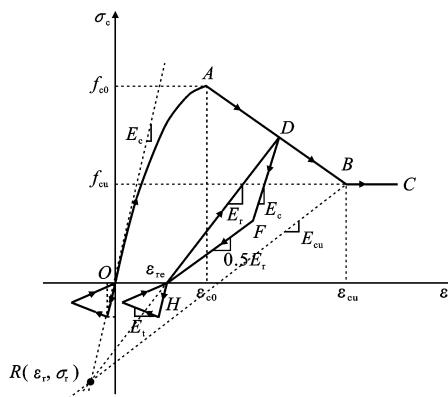


图 2 梁单元混凝土本构关系

Fig. 2 Constitutive Model of Concrete for Beam Element

式中: f_{c0} 为混凝土的轴心抗压强度; ϵ_{c0} 为应力达到轴心抗压强度时对应的混凝土应变; ϵ_{cu} 为混凝土的极限压应变; f_{cu} 为应变达到极限压应变时对应的混凝土强度; σ_c 为混凝土的压力; ϵ_c 为混凝土的压应变。

滞回准则采用由 Yassin^[11] 提出的可以考虑刚度退化和滞回耗能的加卸载准则。该准则规定混凝土的再加载路径都相交于同一个公共点 $R(\epsilon_r, \sigma_r)$, 而公共点 $R(\epsilon_r, \sigma_r)$ 为原点的初始切线刚度 E_c 与极限压应变 ϵ_{cu} 对应的应力点 $B(\epsilon_{cu}, f_{cu})$ (后文称极限点) 再加载刚度 E_{cu} 的交点。若假定极限点的再加载刚度为已知, 则可根据该准则求得对应的单调曲线上每一点的再加载刚度。本文以一个系数 d_{cu} 来确定极限点的再加载刚度, 即 d_{cu} 为极限点的再加载刚度 E_{cu} 与初始切线刚度 E_c 的比值。可求得公共点 $R(\epsilon_r, \sigma_r)$ 的应变 ϵ_r 和应力 σ_r 分别为

$$\epsilon_r = \frac{f_{cu} - d_{cu} E_c \epsilon_{cu}}{E_c - d_{cu} E_c} \quad (2)$$

$$\sigma_r = E_c \epsilon_r \quad (3)$$

$$E_c = \frac{2f_{c0}}{\epsilon_{c0}} \quad (4)$$

确定公共点 $R(\epsilon_r, \sigma_r)$ 后, 受压混凝土卸载与再加载曲线的确定仅取决于当前卸载点 $(\epsilon_{un}, \sigma_{un})$, ϵ_{un} , σ_{un} 分别为受压混凝土从骨架曲线开始卸载时的应变和应力。卸载点 $(\epsilon_{un}, \sigma_{un})$ 和公共点 $R(\epsilon_r, \sigma_r)$ 连线与横轴的交点定义为残余应变点 ϵ_{re} , 其斜率即为混凝土再加载刚度 E_r 。卸载曲线则由初始卸载刚度 E_c 和后续卸载刚度 $0.5E_r$ 两条线段组成, 即先按照初始卸载刚度 E_c 卸载, 当卸载至与经过残余应变点且卸载刚度为 $0.5E_r$ 卸载路径相交时, 改为按刚度为 $0.5E_r$ 的路径卸载。卸载曲线初始段、卸载段、再加载段的应力表达式为

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c (\epsilon_c - \epsilon_{un}) + \sigma_{un} & \text{初始段} \\ 0.5E_r (\epsilon_c - \epsilon_{re}) & \text{卸载段} \\ E_r (\epsilon_c - \epsilon_{re}) & \text{再加载段} \end{cases} \quad (5)$$

混凝土受拉时, 在开裂前通常认为是线弹性的, 在开裂后由于黏结作用, 仍可以使相邻裂缝之间的混凝土承受一定的拉力, 即混凝土受拉刚化效应。采用双折线模型来描述混凝土的受拉性能, 其表达式为

$$\sigma_t = \begin{cases} E_t \epsilon_t & \epsilon \leq \epsilon_t \\ f_t - E_t (\epsilon_t - \frac{f_t}{E_t}) & \epsilon > \epsilon_t \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_t 为混凝土的抗拉强度; σ_t 为混凝土的受拉应力; ϵ_t 为混凝土的受拉应变。

受拉卸载时卸载曲线指向受拉起点。

1.3 实体混凝土本构关系

为了更加合理反映受压时箍筋对混凝土的约束效应, 本文在对几种约束模型进行试算后, 选择了 Mander 约束混凝土本构模型^[12-15]。该模型可同时考虑构件中纵、横向配筋对混凝土约束效应的影响, 其单调加载的应力-应变曲线如图 3 所示。

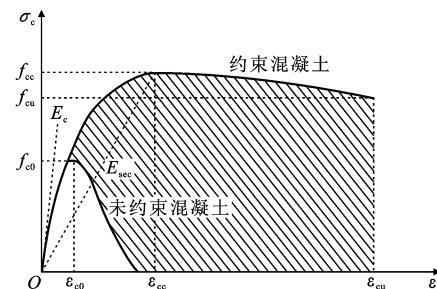


图 3 Mander 混凝土本构关系

Fig. 3 Mander Constitutive Model of Concrete

全曲线由下列公式确定

$$\sigma_c = \frac{f_{cc} x r}{r - 1 + x^r} \quad (7)$$

$$x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}} \quad (8)$$

$$\epsilon_{cc} = \epsilon_{c0} [1 + 5(\frac{f_{cc}}{f_{c0}} - 1)] \quad (9)$$

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (10)$$

$$E_{sec} = \frac{f_{cc}}{\epsilon_{cc}} \quad (11)$$

$$f_{cc} = f_{c0} (-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f_1}{f_{c0}}} - 2 \frac{f_1}{f_{c0}}) \quad (12)$$

式中: f_{cc} 为约束混凝土的抗压强度; ϵ_{cc} 为约束混凝土达到其约束强度时的应变; E_c 取为 $5000 \sqrt{f_{c0}}$;

E_{sec} 为约束混凝土达到其约束强度时的割线刚度; f'_1 为横向钢筋对混凝土的有效约束应力。

在往复荷载作用下,卸载及再加载曲线应能反映混凝土滞回、强度退化以及刚度退化的特性。ABAQUS中的混凝土塑性损伤本构模型可考虑混凝土在循环荷载下随应变增加时的强度、刚度退化。本文中混凝土塑性损伤本构模型参数取值见表1。

表1 塑性损伤模型参数取值

Tab. 1 Values of Parameters in Plastic Damage Model

参数	$\Psi/(^\circ)$	m	f_{b0}/f_{c0}	k	v
参数值	37	0.1	1.16	0.667	5×10^{-5}

注: Ψ 为膨胀角; m 为流动势偏移量; f_{b0}/f_{c0} 为双轴极限抗压强度与单轴极限抗压强度比值; k 为拉伸子午面上与压缩子午面上第二应力不变量之比; v 为黏性系数。

本文选择的卸载规则取自混凝土规范中的受压混凝土卸载及再加载规则^[16],如图4所示。在加载后期卸载刚度会有增加现象,其卸载及再加载路径可按下列部分修正后的公式确定,即

$$\sigma = E_r(\epsilon - \epsilon_z) \quad (13)$$

$$E_r = \frac{\sigma_{un}}{\epsilon_{un} - \epsilon_z} \quad (14)$$

$$\epsilon_z = \epsilon_{un} - \frac{(\epsilon_{un} + \epsilon_{ca})\sigma_{un}}{\sigma_{un} + E_c \epsilon_{ca}} \quad (15)$$

$$\epsilon_{ca} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_{un}} \sqrt{\epsilon_c \epsilon_{un}} \quad (16)$$

式中: ϵ_z 为受压混凝土卸载至零应力点时的残余应变; ϵ_{ca} 为附加应变。

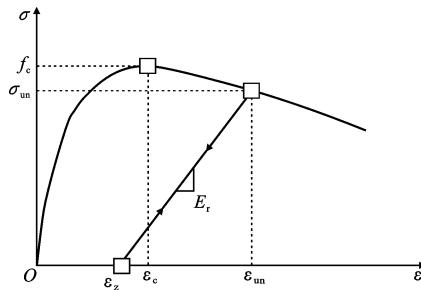


图4 混凝土规范中卸载与再加载规则

Fig. 4 Unloading and Loading Rules in Concrete Code

1.4 应变率效应

人们很早就认识到混凝土材料动力加载时强度存在率敏感性^[17],随后国内外学者对混凝土的动态性能进行了大量研究,结果表明,混凝土的单轴动态抗压强度较静态有提高,并且随应变率的加大,提高更明显^[18-21]。在上述基础上,本文采用了CEB规范建议的混凝土动力本构模型^[22],在分析时考虑了应变率对混凝土强度的影响,其计算公式如下

$$\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{cs}} = \begin{cases} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{1.026a} & \dot{\epsilon} \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ \gamma \dot{\epsilon}^{\frac{1}{3}} & \dot{\epsilon} > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (17)$$

$$\lg(\gamma) = 6.156a - 0.49 \quad (18)$$

$$a = (5 + 0.9\sigma_{cs})^{-1} \quad (19)$$

式中: σ_{cd} 为应变率 $\dot{\epsilon}$ 时的混凝土动力抗压强度; σ_{cs} 为混凝土静态抗压强度; $\dot{\epsilon}_0 = 3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

本文模拟过程中应变率取值由试验实测应变时程确定,取 $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。另外,应力-应变曲线计算的应力、应变为名义应力和名义应变,ABAQUS 中输入时需要将名义应力和名义应变转化为实际应力和实际应变。

2 两尺度模型的建立

2.1 纤维梁单元模型的建立

本文选用ABAQUS中的梁单元类型是B31单元,该单元是基于Timoshenko梁理论构建的,可以考虑剪切变形的影响,但由于材料纤维模型基于平截面假定的前提,在计算中并不计算剪切刚度,使用时需要为梁单元指定额外的横向剪切刚度。当不考虑剪切刚度影响时,往往指定剪切刚度为一大数,其对计算结果影响不大。

由于钢筋混凝土中含有钢筋和混凝土2种材料,ABAQUS不能直接建立钢筋混凝土梁单元,在模拟钢筋混凝土梁单元中纵向配筋的作用时,常用的方法一般有通过关键字*Rebar命令添加纵筋和纵筋箱形截面等效2种方法。***Rebar**关键字只适用于隐式分析,且钢筋的应力、应变状态等需要在dat文件中查看。

本文选用了纵筋箱形截面等效的方法,等效过程见图5,其中,B为柱截面宽度,H为柱截面高度, A_1 为单根纵筋截面面积,c为保护层厚度,b为等效后钢箱宽度,h为等效后钢箱高度,t,xt均为相应边的钢箱厚度。

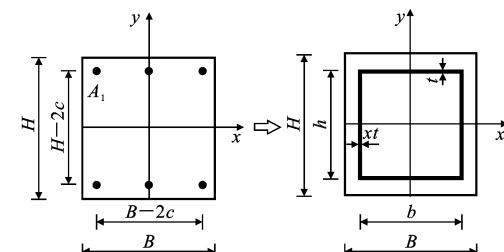


图5 纵筋箱形截面等效图

Fig. 5 Longitudinal Reinforcement Box

Section Equivalent Diagram

等效后可采用共节点技术实现钢筋混凝土梁单元的建模,在这里用到 *Elcopy 命令对单元进行复制。

完成复制后,可分别给两单元集合赋予混凝土和钢材的材料属性。有时为了更精确地模拟梁单元的性能,需要更多的纤维(即截面分点),此时可在 *Beam Section 部分进行积分点数的设置(必须为奇数)。

2.2 梁单元的划分

在 ABAQUS 中,梁单元采用的是基于刚度法的纤维模型,由于混凝土具有很强的非线性,在进入非线性后期时,实际的变形与假设的形函数之间差别较大,为了提高精度,只有加大网格密度。同时,混凝土还具有强度软化的特点,在软化段时,刚度为负值,由于应变的局部化影响,过密的网格划分会使结果失真,因此要合理地确定单元数量。根据破坏时梁柱构件的实际破坏情况,Legeron 等^[23]建议按照与梁柱破坏时塑性段长度相一致的单元长度进行划分。塑性段的长度 l_p 可按下式确定

$$l_p = 0.08L + 0.022d_b f_y \quad (20)$$

式中: L 为梁(柱)端至反弯点的长度; d_b, f_y 分别为纵筋直径和屈服强度。

2.3 两尺度模型的界面连接

在建立多尺度模型时,保证不同单元类型之间的合理连接与变形协调是很重要的,也是难点。不同类型单元在界面处的连接应在不损失宏观单元自由度的前提下,尽量不增加微观单元的额外约束。由于不同类型单元的节点自由度与精度不同,因此,很难实现没有任何瑕疵的连接。

本文涉及的是梁单元与实体单元的连接,对于实体单元,每个节点只有 2 个平动自由度,没有转动自由度,而梁单元节点同时存在平动自由度与转动自由度。在 ABAQUS 中采用 Interaction 中的 Coupling 命令将二者进行连接,该命令可保证节点与界面之间的横向位移及转动协调,转动自由度的传递按照平截面假定。

3 试验试件两尺度模拟

3.1 试验试件概况

本文以笔者所在课题组开展的钢筋混凝土柱动力滞回行为试验试件为对象进行两尺度数值模拟研究^[24]。试件详细构造和配筋如图 6 所示。

柱横截面尺寸为 250 mm×250 mm,柱高 1 150 mm,计算高度为 1 000 mm,柱子底部固定在尺寸为

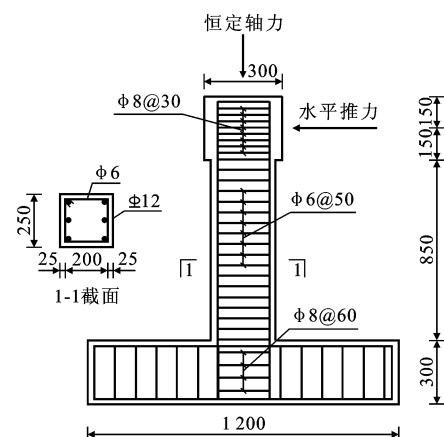


图 6 钢筋混凝土柱试件(单位:mm)

Fig. 6 RC Column Specimen (Unit:mm)

1 200 mm×500 mm×300 mm 的钢筋混凝土基座上。混凝土采用 C40 混凝土,保护层厚度为 25 mm,纵向受力钢筋为 HRB335 级热轧变形钢筋,直径为 12 mm。箍筋为 HPB235 级钢筋,直径为 6 mm,沿柱身等距布置,间距为 50 mm。

试验加载制度如图 7 所示,采用位移控制加载,在加载过程中保持作动器加载速率恒定。整个加载过程的加载等级分为 2.5, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 mm, 共 9 个加载等级,每一加载等级加载 3 个循环。试件材料参数均采用试验实测值,试验实测结果见表 2。

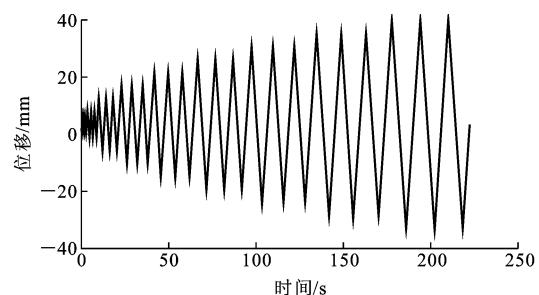


图 7 柱试件加载制度

Fig. 7 Loading Rule for Column Specimen

表 2 实测材料参数

Tab. 2 Material Parameters by Testing

试件编号	混凝土立方体强度/MPa	纵筋屈服强度/MPa	纵筋抗拉强度/MPa	纵筋弹性模量/MPa
C3-2	45.5	378.9	551.4	2.0×10^5

3.2 模拟结果分析

为了进行比较,本文分别建立了试件的纤维梁模型、实体模型和两尺度模型,如图 8 所示。建模高度为柱计算高度。实体模型中,对其顶面采用参考点耦合命令来加载。

各模型计算结果与试验结果对比如图 9 所示。

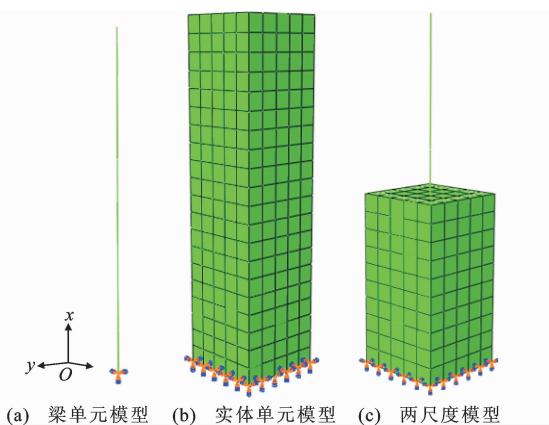


图8 不同尺度模型与网格划分

Fig. 8 Different Scale Models and Meshing

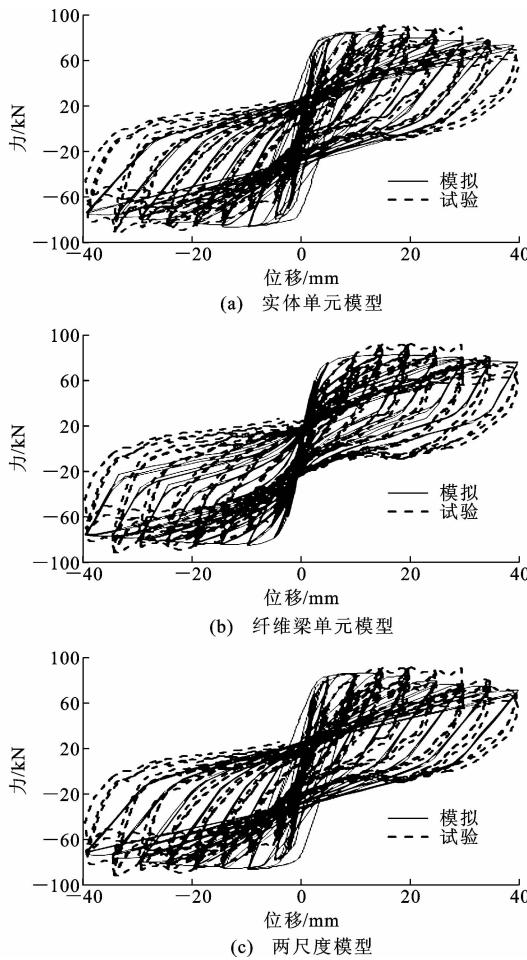


图9 滞回曲线对比

Fig. 9 Comparison of Hysteretic Curves

从图9可以看出,在骨架曲线方面,3种模型的骨架曲线趋势相同,与试验结果基本吻合,可以反映出混凝土的强度退化特性。在卸载方面,纤维模型的卸载更接近于试验结果,能较好反映钢筋混凝土的刚度退化,实体模型在卸载方面的表现不如纤维模型,但两尺度模型在与实体模型相比较卸载段有一定程度的改善。

另外,3种模型的计算滞回曲线捏拢不如试验曲线明显。

表3为试验峰值荷载和各模型峰值荷载的比较。从表3可以看出:在峰值荷载方面,实体模型与两尺度模型基本与试验相同,正向峰值荷载相差分别为6.05%和5.78%,负向峰值荷载相差分别为5.75%和6.47%;纤维模型的峰值荷载要偏低一些,正向峰值荷载相差10.71%,负向峰值荷载相差7.01%。总体来说,3种模型在强度方面的模拟基本可以满足分析需要,误差在可以接受的范围内。

表3 各峰值荷载对比

Tab. 3 Comparison of Peak Loads

数据来源	试验	实体模型	纤维模型	两尺度模型
正向峰值荷载/kN	92.37	86.78	82.47	87.03
负向峰值荷载/kN	-91.33	-86.08	-84.92	-85.41
正向峰值荷载差值/%	0.00	6.05	10.71	5.78
负向峰值荷载差值/%	0.00	5.75	7.01	6.47

表4为各模型单元数和计算时间对比。由表4可见,采用两尺度模拟,在较好模拟钢筋混凝土柱破坏形式的情况下,可以大幅降低计算时间,提高计算效率。

表4 各模型单元数和计算时间对比

Tab. 4 Comparison of Element Numbers and Computation Time in Models

模型	实体模型	纤维模型	两尺度模型
单元数	746	16	384
CPU用时/s	1 801.5	160.4	979.8

图10为第1次达最大位移时两尺度模型和实体模型的混凝土Mises应力图比较。从图10可以看出,两尺度模型与实体模型的实体单元段应力分布十分接近,表明采用两尺度建模可较好模拟钢筋混凝土柱在动力荷载作用下的整体行为和局部破坏形式。

从表3、4和图10可以看出:在CPU用时方面,纤维模型用时最短,但是计算的峰值荷载与实体模型和两尺度模型相比较精度相对较差,同时计算结果并不能反映柱的细部破坏特征。实体模型的计算时间大幅增加,结果既可满足精度的要求,也可满足细部破坏的模拟,但计算成本最大。两尺度模型在计算时间和计算精度上都较合理,处理得当时既可以反映柱关键部位(柱端)的细部破坏,又可以大量减少计算时间。

4 结语

(1)二次开发编写的基于纤维梁理论的混凝土

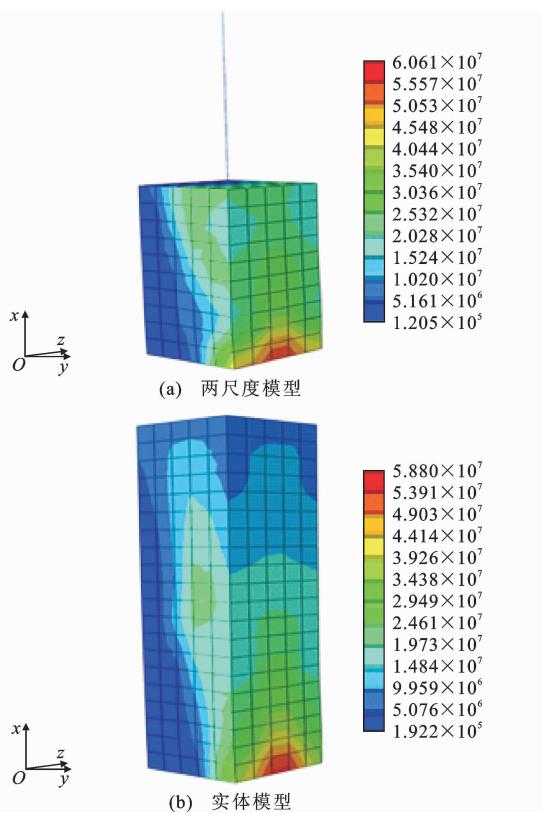


图 10 第 1 次达到最大位移时的混凝土应力分布(单位:Pa)

Fig. 10 Stress Distribution of Concrete when Specimen Is at Maximum Displacement for the First Time (Unit:Pa)

和钢筋材料子程序能够用于模拟钢筋混凝土柱的滞回特性及捏拢特性,与试验结果吻合良好。

(2)考虑应变率效应,开展了钢筋混凝土柱在快速循环加载下基于 3 种尺度有限元模型的数值模拟,结果表明,两尺度模型可以较高计算效率进行钢筋混凝土柱动力滞回性能的模拟,并较好描述试件的局部破坏特征。

(3)两尺度模型既可以反映试件的整体动力滞回特性以及细部破坏特征,又可以显著减少计算时间,实现计算精度与计算时间的平衡,提高计算分析效率,并为后续结构层次的多尺度分析提供依据。

参考文献:

References:

- [1] 李杰,吴建营,陈建兵.混凝土随机损伤力学[M].北京:科学出版社,2014.
LI Jie, WU Jian-ying, CHEN Jian-bing. Stochastic Damage Mechanics of Concrete Structures [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [2] 朱元祥,李航飞,孙东晓.“5·12”汶川地震后陕西宝鸡陈仓区建筑物震害调查与分析[J].建筑科学与工程学报,2009,26(2):116-120.
ZHU Yuan-xiang, LI Hang-fei, SUN Dong-xiao. Damage Investigation and Analysis of Buildings in Chen-caang County of Baoji City, Shaanxi Province After “5·12” Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 116-120.

ZHU Yuan-xiang, LI Hang-fei, SUN Dong-xiao. Damage Investigation and Analysis of Buildings in Chen-caang County of Baoji City, Shaanxi Province After “5·12” Wenchuan Earthquake [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 116-120.

- [3] 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.
LU Xin-zheng, LIN Xu-chuan, YE Lie-ping. Multi-scale Finite Element Modeling and Its Application in Structural Analysis [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2008, 25(4): 76-80.
- [4] 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——从材料多尺度力学到结构多尺度力学[J].力学进展,2007,37(3):321-336.
WU Bai-jian, LI Zhao-xia, TANG Ke-ke. Multi-scale Modeling and Damage Analyses of Large Civil Structure — Multi-scale Mechanics from Material to Structure [J]. Advances in Mechanics, 2007, 37 (3): 321-336.
- [5] 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.
- [6] KHANDELWAL K. Multi-scale Computational Simulation of Progressive Collapse of Steel Frames [D]. Ann Arbor: University of Michigan, 2008.
- [7] BROUGHTON J Q, ABRAHAM F F, BERNSTEIN N, et al. Concurrent Coupling of Length Scales: Methodology and Application [J]. Physical Review B, 1999, 60(4): 2391-2403.
- [8] 李宏男,王大东.钢筋混凝土结构多尺度建模与数值分析[J].建筑科学与工程学报,2014,31(2):20-25.
LI Hong-nan, WANG Da-dong. Multi-scale Finite Element Modeling and Numerical Analysis of Reinforced Concrete Structure [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(2): 20-25.
- [9] CLOUGH R W. Effect of Stiffness Degradation on Earthquake Ductility Requirements [R]. Berkeley: University of California, 1966.
- [10] 陈学伟,林哲.结构弹塑性分析程序 OpenSEES 原理与实例[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
CHEN Xue-wei, LIN Zhe. Structural Nonlinear Analysis Program OpenSEES Theory and Tutorial [M].

- Beijing:China Architecture & Building Press,2014.
- [11] YASSIN M H M. Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Structures Under Monotonic and Cyclic Loads[D]. Berkeley:University of California,1994.
- [12] PARK R,PRIESTLEY M J N,GILL W D. Ductility of Square-confined Concrete Columns[J]. Journal of the Structural Division,1982,108(4):929-950.
- [13] 韩林海,陶忠.方钢管混凝土轴压力学性能的理论分析与试验研究[J].土木工程学报,2001,34(2):17-25.
HAN Lin-hai, TAO Zhong. Study on Behavior of Concrete Filled Square Steel Tubes Under Axial Load [J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(2): 17-25.
- [14] LEGERON F, PAULTRE P. Uniaxial Confinement Model for Normal and High-strength Concrete Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 129 (2):241-252.
- [15] MANDER J B,PRIESTLEY M J N,PARK R. Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8):1804-1826.
- [16] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010,Code for Design of Concrete Structures[S].
- [17] ABRAMS D A. Effect of Rate of Application of Load on the Compressive Strength of Concrete[J]. ASTM Journal,1917,17(2):364-377.
- [18] ATCHLEY B L,FURR H L. Strength and Energy Absorption Capabilities of Plain Concrete Under Dynamic and Static Loadings[J]. Am Concrete Inst Journal & Proceedings,1967,64(11):745-756.
- [19] TEDESCO J W, POWELL J C, ROSS C A, et al. A Strain-rate-dependent Concrete Material Model for ADINA[J]. Computers and Structures, 1997, 64 (5/6):1053-1067.
- [20] 肖诗云.混凝土率型本构模型及其在拱坝动力分析中的应用[D].大连:大连理工大学,2002.
XIAO Shi-yun. Rate-dependent Constitutive Model of Concrete and Its Application to Dynamic Response of Arch Dams[D]. Dalian; Dalian University of Technology, 2002.
- [21] 王海龙,李庆斌.不同加载速率下干燥与饱和混凝土抗压性能试验研究分析[J].水力发电学报,2007,26 (1):84-89.
WANG Hai-long, LI Qing-bin. Experiments of the Compressive Properties of Dry and Saturated Concrete Under Different Loading Rates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1):84-89.
- [22] CEB-FIP, Model Code 1990[S].
- [23] LEGERON F, PAULTRE P, MAZARS J. Damage Mechanics Modeling of Nonlinear Seismic Behavior of Concrete Structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(6):946-955.
- [24] 江洲.钢筋混凝土柱动力性能试验及数值模拟研究[D].长沙:湖南大学,2012.
JIANG Zhou. Experimental and Numerical Study on Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Columns [D]. Changsha: Hunan University, 2012.