

基于 ABAQUS 纤维梁的钢筋混凝土材料 模型二次开发

张 皓¹, 曹光伟¹, 李宏男¹, 王德斌², 李 敏³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 大连交通大学土木与安全工程学院,
辽宁 大连 116028; 3. 大连海洋大学海洋与土木工程学院, 辽宁 大连 116023)

摘 要 目的 研究 ABAQUS 纤维梁钢筋混凝土材料本构模型,以解决软件中缺乏可用的三维梁单元约束混凝土材料模型及软件自带金属塑性材料模型无法考虑加卸载过程中刚度退化等问题. 方法 采用 FORTRAN 语言,基于经典混凝土和钢筋单轴材料本构模型,开发用于显式模块的钢筋混凝土梁单元材料子程序. 首先,通过对钢筋的变幅值拉伸试验和素混凝土柱往复拉、压过程的模拟对子程序的有效性进行了初步验证;其次,分别采用不同的材料本构模型对钢筋混凝土梁、柱拟静力试验进行数值仿真,验证子程序用于构件分析的准确性和有效性;最后,以一个 12 层方钢管混凝土平面框架结构为例,分别建立二维和三维有限元模型,并进行地震作用下动力弹塑性时程分析. 结果 钢筋混凝土梁、柱试验的数值模拟结果与试验结果吻合良好,对比误差均小于 4%,对钢管混凝土平面框架结构弹塑性地震反应分析结果也较为理想. 结论 采用不同钢筋加载规则得到的构件荷载-位移骨架曲线大致相同,但滞回捏拢行为有显著改变. 与 ABAQUS 自带材料本构模型相比,笔者所开发的材料子程序可以更好地反映循环荷载作用下钢筋混凝土构件及结构的力学特性,可用于构件及结构的非线性分析.

关键词 钢筋混凝土;梁单元;子程序;二次开发;非线性分析

中图分类号 TU375

文献标志码 A

Secondary Development on Constitutive Model of Concrete and Steel for Beam Element in ABAQUS

ZHANG Hao¹, CAO Guangwei¹, LI Hongnan¹, WANG Debin², LI Min³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. School of Civil and Safe Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian, China, 116028; 3. School of Marine and Civil Engineering, Dalian Ocean University, Dalian, China, 116023)

收稿日期:2017-09-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0701108);国家自然科学基金青年基金项目(51308356);辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LJQ2015092);住房和城乡建设部科学技术项目(2015-k2-010);沈阳建筑大学科学研究项目(2017005)

作者简介:张皓(1983—),男,副教授,博士,主要从事工程结构抗震方面研究.

Abstract: To study the constitutive model of reinforced concrete material for ABAQUS fiber beam, and solve the problems that the lack of confined concrete constitutive model applied to three-dimensional (3D) beam element in ABAQUS and that the owned metal constitutive model in ABAQUS cannot consider the effect of stiffness degradation, based on the classical uniaxial constitutive models of concrete and reinforcing steel, a VUMAT subroutine, involved the behavior of concrete damage plasticity and two kinds cyclic loading constitutive models of reinforcing steel, was compiled by FORTRAN. Firstly, the validity of subroutine was preliminary verified by means of the numerical simulation about a tension and compression test for reinforcing steel and plain concrete column; secondly, the numerical simulations for unidirectional quasi-static loading test of reinforced concrete (RC) column and beam were conducted, and the simulation results have a good agreement with experimental results, and relative errors are less than 4%. It is shown that the subroutine can simulate the hysteretic performance of RC members well. Meanwhile, comparing with the calculated results by the owned steel constitutive model in ABAQUS, the results show that the selection of reinforcing hysteretic constitutive model has no obvious effect on the skeleton curve. However, the behavior of hysteresis is significantly changed. Finally, the dynamic elastic-plastic time-history analysis for a 12 storey concrete filled steel tube (CFST) frame structure was conducted, and the simulated result is also satisfactory. So it is shown that the developed subroutine is available to apply to the non-linear analysis of structures under dynamic loadings.

Key words: reinforcing concrete; beam element; subroutine; secondary development; non-linear analysis

强震作用下的结构破坏和倒塌是人员伤亡与财产损失的主要原因。因此,准确把握强震作用下结构的受力行为,是结构抗震设计及理论研究的关键问题^[1-4]。近年来,随着计算机技术的不断发展与完善,ABAQUS, MSC. Marc 等分析软件在结构抗震设计中已得到广泛应用^[5]。陆新征等^[6]采用 MSC. Marc 软件,对某 500 m 超高层建筑进行了抗震设计及优化措施的研究,结果表明,了解结构倒塌破坏机制有利于改进超高层建筑的抗震设计。齐虎等^[7]基于 ABAQUS 软件平台,对带大悬挑钢桁架的高层建筑进行了大震下的弹塑性分析,分析结果表明,结构满足“大震不倒”的抗震设防要求。黄忠海等^[8]对某复杂超高层结构进行了罕遇地震下的弹塑性时程分析,结果表明,结构延性和抗震承载力满足要求。

材料本构模型是有限元数值仿真的基础,对数值仿真的效率与精度有重要影响。目前 ABAQUS 软件自带的钢筋和混凝土本构

模型尚存在不足。因此,准确定义钢筋和混凝土的材料本构关系至关重要。韩军等^[9]基于 Scott - Kent - Park 模型,在 ABAQUS 平台下开发了适用于梁单元的混凝土材料子程序,并通过振动台试验对所程序的开发进行了验证;尚兵等^[10]基于《混凝土结构设计规范》提供的混凝土单轴拉、压本构关系,开发了用于 ABAQUS 显式模块下的梁单元材料子程序,并用程序模拟得到轴压作用下的钢筋混凝土柱的滞回关系;雷拓等^[11]采用 FORTRAN 语言编制了纤维梁单元模型的钢筋、混凝土材料子程序。通过与拟静力试验及足尺振动台试验结果对比,验证了程序的可靠性;王强等^[12]利用 ABAQUS 编制了用于显式模块下的梁单元混凝土、钢筋本构模型的子程序,并对往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能进行了数值模拟,结果表明,数值模拟结果与试验结果吻合良好。

目前,材料子程序的开发一般以混凝土材料模型为主,针对钢筋子程序的开发较少。

同时,针对不同钢筋滞回模型对构件滞回行为的影响研究尚不多见。基于此,笔者采用修正的 Kent - Park 模型^[13],开发了可考虑箍筋约束效应的三维梁单元混凝土材料子程序;同时,基于 Clough 模型^[14]与 Légeron 模型^[15]开发了可考虑刚度退化的三维梁单元钢筋材料子程序。笔者分别从材料与构件层次上对不同子程序的可行性进行了验证,然后分别采用 ABAQUS 自带材料模型和所编材料模型对一平面框架结构进行动力弹塑性时程分析,验证了子程序用于结构非线性分析可靠性。

1 VUMAT 基本原理

由于自身材料库所提供的材料本构模型有限,ABAQUS 允许用户根据实际需要进行程序的二次开发。VUMAT 主要计算思路是采用上一步的状态变量、应力和当前的应变增量,通过调用子程序中给定的材料本构关系,计算得到当前的状态变量和应力,并在单元划分的积分点上递推计算此积分点变量之间的关系,其流程如图 1 所示。

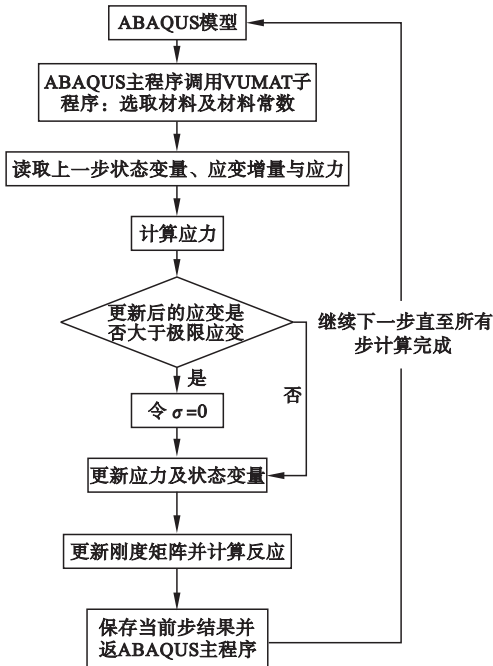


图 1 VUMAT 流程图

Fig. 1 Flow chart of VUMAT

以 B31 梁单元为例,VUMAT 通过给定的正应变增量和切应变增量更新正应力 s_{11} 和剪应力 s_{12} ,而其他应力均为 0,其中 s_{11} 按子程序中给定的材料本构关系进行更新,而 s_{12} 按弹性胡克定律更新,其具体描述可见参考文献[16]。

2 材料本构模型

2.1 钢筋本构模型

钢筋骨架曲线采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)所建议的双折线模型见式(1),其中极限应变取 40 倍的屈服应变。

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon, & \varepsilon \leq \varepsilon_y; \\ f_y - k(\varepsilon - \varepsilon_y), & \varepsilon_y < \varepsilon \leq \varepsilon_u; \\ 0, & \varepsilon > \varepsilon_u. \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_s 为钢材的弹性模量; ε_y 为钢材的屈服应变; σ_y 为钢材的屈服强度; ε_u 为钢材的极限应变; σ_u 为钢材的屈服强度; k 为强化段斜率。

钢筋反复加卸载关系分别采用 Clough 模型和 Légeron 模型,如图 2 所示。此外,考虑到数值以及本构模型自身的缺陷,笔者对其做了适当修正,具体情况如下:

(1)所有卸载近似为线弹性卸载,按初始弹性模量 E_s 计算;

(2)反向再加载(见图 2 中①与②所示)应力采用下式计算:

1) Clough 模型

$$\sigma = E_z (\varepsilon - \varepsilon_{a,i}), \quad (2)$$

$$E_z = \frac{\sigma_{b,i} - \sigma_{a,i}}{\varepsilon_{b,i} - \varepsilon_{a,i}}, \quad (3)$$

2) Légeron 模型

$$\sigma = [E_s (\varepsilon - \varepsilon_{a,i}) + \sigma_{a,i}] - [E_s (\varepsilon_{b,i} - \varepsilon_{a,i}) - (\sigma_{b,i} - \sigma_{a,i})] \left[\frac{\varepsilon - \varepsilon_{a,i}}{\varepsilon_{b,i} - \varepsilon_{a,i}} \right]^p, \quad (4)$$

$$p = \frac{(E_s - E_h)(\varepsilon_{b,i} - \varepsilon_{a,i})}{E_s(\varepsilon_{b,i} - \varepsilon_{a,i}) - (\sigma_{b,i} - \sigma_{a,i})}. \quad (5)$$

式中: E_z 为再加载刚度; E_h 硬化段斜率; $\sigma_{a,i}$ 、

$\varepsilon_{a,i}$ 为第*i*次反向加载点处的应力和应变;
 $\sigma_{b,i}$ 、 $\varepsilon_{b,i}$ 分别为第*i*次卸载处的应力和应变。
如果再加载方向钢筋未曾屈服,则取钢筋初始屈服应变和应力,若再加载方向曾发生屈服,则取该加载方向历史最大应变和应力。

(3)在处理骨架曲线处卸载的同向再加载(见图2中③所示)情形时,Légeron模型所得到的应力值会无穷大,为简化起见,该情形应力按线弹性计算。

(4)假如在*A*处卸载(见图3),之后在 ε_1 、 ε_2 之间进行反复卸载和再加载,可以看出,如果此时的加载规则仍取Clough模型或Légeron模型,应力逐步减少,这与实际情况不符。因此,当再加载曲线处有不完全卸载(见图2中④所示)时,其再加载应力按线弹性计算,直至达到之前的卸载点应力后,再按原曲线计算应力。

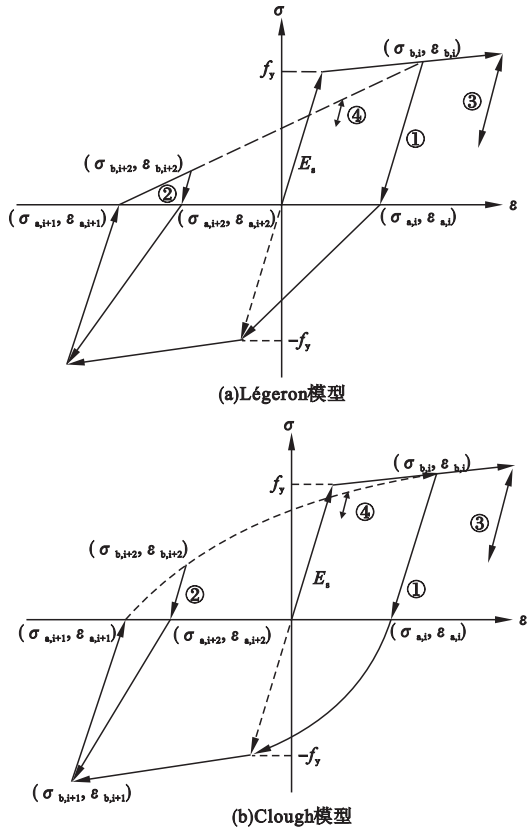


图2 钢筋反复加载卸载本构模型

Fig. 2 Constitutive models of reinforcing steel under repeated loading

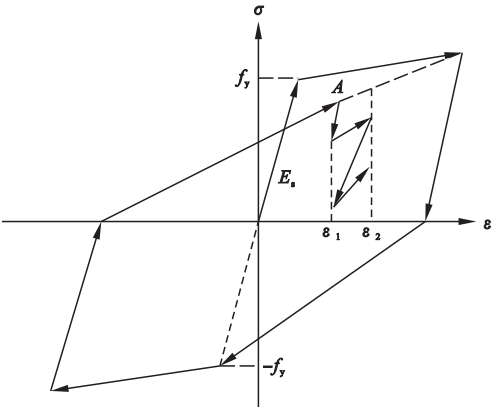


图3 加载规则修正

Fig. 3 Modification of loading rule

2.2 混凝土本构模型

混凝土单轴受拉本构关系按《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)确定,见式(6)~(9):

$$\sigma = (1 - d_t) E_c \varepsilon, \tag{6}$$

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t (1.2 - 0.2x^5), & x \leq 1; \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t (x - 1)^{1.7} + x}, & x > 1. \end{cases} \tag{7}$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}}, \tag{8}$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}. \tag{9}$$

式中: α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值; $f_{t,r}$ 为混凝土的单轴抗拉强度代表值,其值根据实际结构分析需要取值; $\varepsilon_{t,r}$ 为与单轴抗拉强度代表值 $f_{t,r}$ 相对应的混凝土峰值拉应变; d_t 为混凝土单轴受拉损伤演化参数。

混凝土受压本构关系采用修正的Kent-Park模型,见式(10)~(13):

$$\sigma = \begin{cases} Kf'_c [2(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}) - (\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0})^2], & \varepsilon \leq \varepsilon_0; \\ Kf'_c [1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)], & \varepsilon_0 < \varepsilon_c \leq \varepsilon_u; \\ 0.2Kkf'_c, & \varepsilon > \varepsilon_u. \end{cases} \tag{10}$$

$$\varepsilon_0 = 0.002 K, \quad (11)$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f_c}, \quad (12)$$

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f_c}{145f_c - 1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002K}. \quad (13)$$

式中: ε_0 为混凝土峰值应力对应的应变; ε_u 为混凝土应力降至 $0.2f'_c$ 时对应的应变; K 为箍筋对混凝土强度提高系数; Z 为应变软化斜率系数; f'_c 为混凝土圆柱体抗压强度; f_{yh} 为箍筋的屈服强度, MPa; ρ_s 为体积配箍率; h' 为箍筋肢距, mm; s_h 为箍筋间距, mm.

2.3 加卸载规则

(1) 在重复荷载作用下, 受压混凝土卸载及再加载应力路径可按式(14)~(17)确定:

$$\sigma = E_r (\varepsilon - \varepsilon_z), \quad (14)$$

$$E_r = \frac{\sigma_{un,i}}{\varepsilon_{un,i} - \varepsilon_{z,i}}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_{un,i} - \frac{(\varepsilon_{un,i} + \varepsilon_{ca}) \sigma_{un,i}}{\sigma_{un,i} + E_c \varepsilon_{ca}}, \quad (16)$$

$$\varepsilon_{ca} = \max \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{un,i}}, \frac{0.09 \varepsilon_{un,i}}{\varepsilon_c} \right) \sqrt{\varepsilon_c \varepsilon_{un,i}}. \quad (17)$$

式中: σ 为受压混凝土的压应力; ε 为受压混凝土的应变; ε_z 为受压混凝土卸载至零应力点时的残余应变; E_r 为受压混凝土卸载/再加载时的变形模量; $\sigma_{un,i}$ 、 $\varepsilon_{un,i}$ 分别为受压混凝土第 i 次从骨架曲线开始卸载时的应力和应变; ε_{ca} 为附加应变; ε_c 为混凝土受压峰值应力对应的应变.

(2) 在重复荷载作用下, 受拉的混凝土卸载时指向原点, 或者指向上一次受压残余应变点; 再加载时则从受压残余应变点开始, 按上次受拉卸载刚度进行再加载, 直至到达上一次受拉骨架曲线卸载点的应力值, 之后再接受拉骨架线加载. 混凝土本构模型如图4所示.

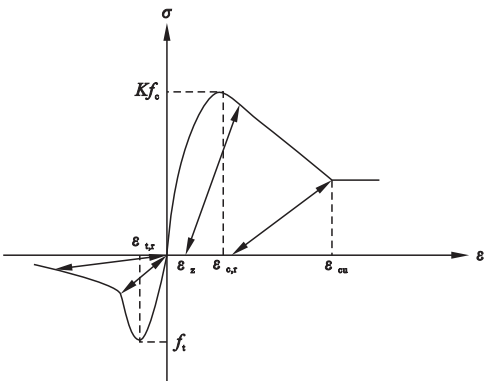


图4 混凝土材料本构模型

Fig. 4 Constitutive model of concrete

3 材料性能验证

3.1 钢筋子程序验证

为验证所开发的钢筋材料子程序, 取文献[17]的 HRB335 钢筋拉伸试验, 建立了长 30 mm, 直径为 10 mm 的 B31 梁单元钢筋模型. 分别采用自编的 Clough 模型、Légeron 模型和 ABAQUS 自带模型对试验结果进行模拟, 得到钢筋的应力-应变曲线(见图5). 由图可知, 采用 Clough 模型和 Légeron 模型所编制的子程序均能有效反映钢材在加卸载过程中的刚度退化. 其中, 采用 Légeron 模型得到的应力-应变曲线与试验曲线吻合度最高, 而 ABAQUS 自带随动强化模型则无法考虑刚度退化的影响, 若将其应用到构件或结构的分析中, 将会给计算结果带来更大误差.

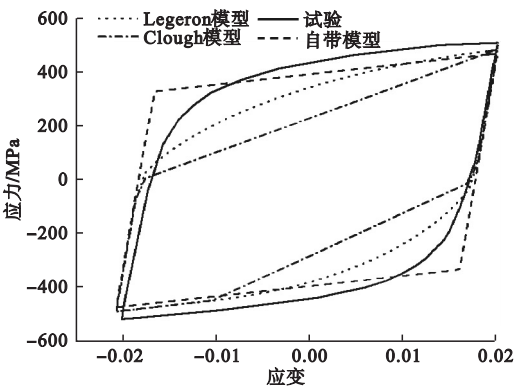


图5 钢筋应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of reinforcing steel

3.2 混凝土子程序验证

为初步验证所开发混凝土材料子程序,

笔者建立了长 $L = 700\text{ mm}$, 截面高 \times 宽为 $b \times h = 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的 C25 素混凝土梁单元有限元模型. 非约束混凝土材料参数按《混凝土结构设计规范》确定, 极限抗压强度取标准值 25 MPa , 箍筋为 HPB300, 体积配箍率取 1% , 肢距与间距比为 2. 在轴向拉、压往复位移荷载作用下, 分别得到拉、压应力 - 应变曲线(见图 6). 可以看出, 与非约束模型相比, 采用修正的 Kent - Park 模型的混凝土临界应变和峰值应力均有一定增加, 与理论趋势一致. 初步验证了混凝土材料子程序用于材料性能分析的有效性.

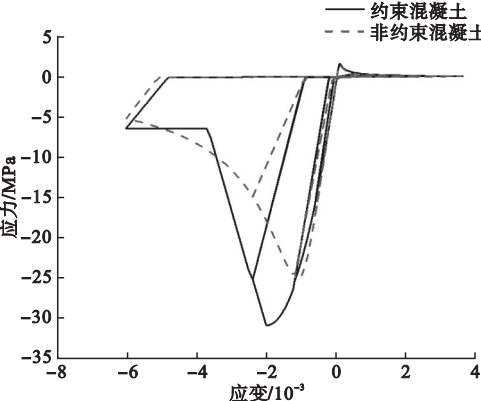


图 6 往复荷载下的混凝土应力 - 应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of concrete under repeated loading

4 构件及结构性能验证

4.1 柱拟静力试验模拟

取文献[18]中钢筋混凝土柱静态加载

工况为研究对象, 混凝土强度等级为 C30, 实测混凝土立方体抗压强度标准值为 50.73 MPa , 纵筋采用 HRB335 级钢筋, 实测屈服强度为 381.5 MPa , 轴压比为 0.05, 构件的详细尺寸及配筋见图 7. 采用 B31 梁单元建立了柱的有限元模型, 利用 ELCOPY 命令分别给梁单元赋予不同的截面属性. 柱顶施有侧向位移, 其前两周加载幅值分别为 5 mm 和 10 mm , 各循环 1 次, 之后每级以 5 mm 为增量, 每级循环 3 次, 直至构件破坏.

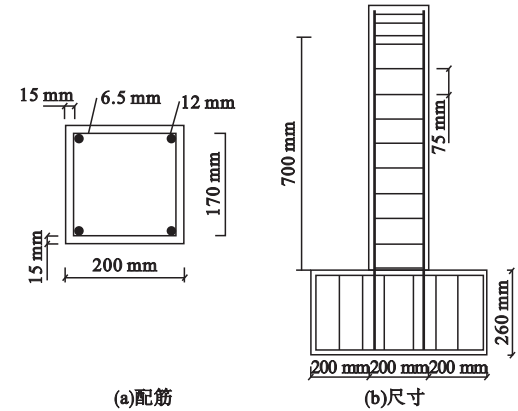


图 7 柱的尺寸及配筋

Fig. 7 Dimensions and reinforcements of column

混凝土采用笔者开发的约束混凝土材料子程序, 钢筋滞回规则分别选用子程序内的 Clough 模型、Légeron 模型和 ABAQUS 自带的滞回模型, 其模拟结果与试验结果的对比见图 8、图 9 及表 1 所示.

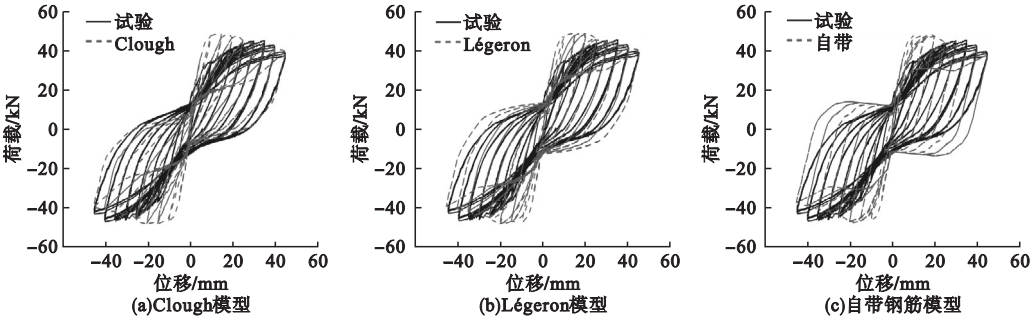


图 8 钢筋混凝土柱的滞回曲线

Fig. 8 Hysteretic curves of reinforced concrete column

由图 8、图 9 及表 1 可以看出, 极限承载力计算值与试验值误差均小于 4% , 模拟精

度较高, 滞回曲线的形状、变形及承载力的退化与试验曲线基本一致. 从加载规则来看, 钢

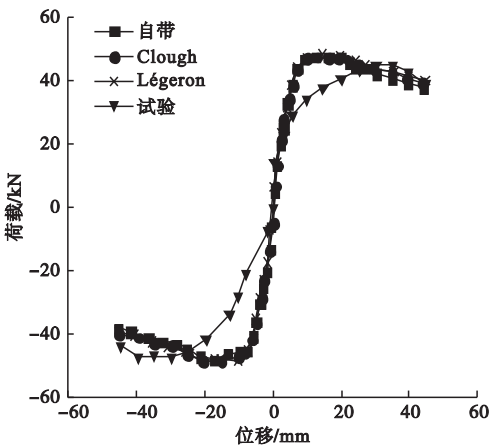


图9 骨架曲线对比

Fig.9 Comparison of skeleton curves

表1 钢筋混凝土柱的极限荷载

Table 1 Ultimate loads of reinforced concrete column

钢筋本构模型	极限荷载/kN		误差 / %
	模拟	试验	
自带模型	48.02	47.04	2.08
Clough	48.24	47.04	2.55
Légeron	48.61	47.04	3.34

筋加载规则的选择对骨架曲线并无明显影响. 由于 ABAQUS 自带模型未考虑再加载过程中的刚度退化, 导致其滞回曲线对捏缩现象反映不足, 与试验曲线差异较大. Légeron 模型与 Clough 模型的模拟曲线与试验曲线更为吻合. 由于钢筋与混凝土接触面的粘结滑移引起了变形和裂缝的进一步发展^[19], 使得钢筋混凝土构件的滞回捏拢行为更为显著, 而 Clough 模型相对更快的刚度衰减等同于近似考虑了粘结滑移的影响, 故 Clough 模型的捏缩效果强于 Légeron 模型. 虽然模拟结果与试验整体吻合, 但模拟所得到的初始刚度和屈服极限承载力偏大, 且过高地估计了结构的延性, 这可能是未考虑构件的初始缺陷(如养护不当)和粘结滑移对承载力的影响. 总之, 所开发子程序可以用于钢筋混凝土构件非线性分析中.

4.2 梁拟静力试验模拟

取文献[20]的 B30 - CS1 钢筋混凝土梁

拟静力加载试验工况进行数值模拟. 该梁为简支梁, 有效长度为 2.34 m, 截面宽高为 $b \times h = 150 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$, 剪跨比为 5.5, 混凝土强度等级为 C30, 立方体抗压强度标准值为 36.94 MPa, 保护层厚度 30 mm, 纵筋等级为 HRB335, 屈服强度为 381.6 MPa, 直径 18 mm, 详细尺寸及配筋如图 10 所示. 在梁跨中施加循环往复位移荷载, 加载幅值为屈服位移 Δy 的整数倍, 每个幅值循环一次, 循环六周. 屈服位移 Δy 通过单调加载模拟得到, 数值模拟得到的屈服位移为 10 mm, 与试验的 9.27 mm 基本一致.

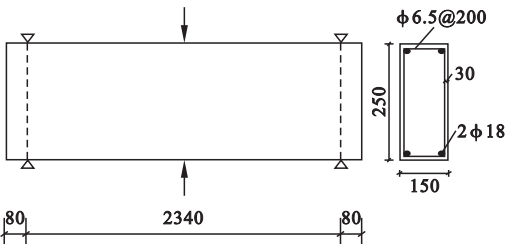


图10 梁的尺寸及配筋

Fig.10 Dimension and reinforcement of beam

模拟结果与试验结果的对比见表 2、图 11、图 12. 可以看出, 极限承载力计算值误差均控制在 2% 以内, 计算曲线走势与实际结果基本一致, 自带钢筋模型曲线过高地估计了混凝土梁的耗能能力, 曲线吻合度最差, 而 Clough 模型的计算曲线与试验吻合度最高, 但计算曲线对强度退化的反映略显不足, 这可能是由于未考虑纵筋的压屈及粘结滑移对承载力的影响造成. 总之, 通过以上分析结果进一步验证了子程序用于钢筋混凝土构件滞回性能分析的有效性.

表2 钢筋混凝土梁极限荷载

Table 2 Ultimate loads of reinforced concrete beam

钢筋本构模型	极限荷载/kN		相对误差 / %
	模拟	试验	
自带模型	75.91	76.17	0.34
Clough	74.93	76.17	1.63
Légeron	75.65	76.17	0.68

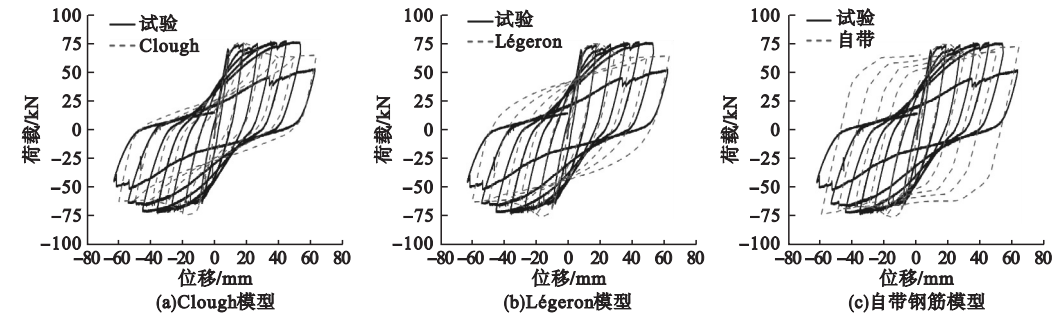


图 11 钢筋混凝土梁滞回曲线

Fig. 11 Hysteretic curves of reinforced concrete beam

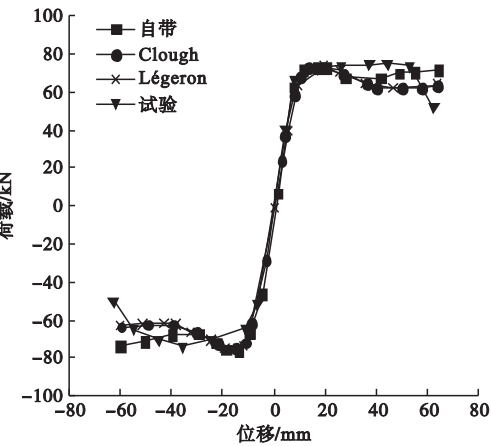


图 12 骨架曲线对比

Fig. 12 comparison of skeleton curves

4.3 方钢管-混凝土框架结构动力弹塑性分析

笔者分别采用二维(2D)和三维(3D)梁单元建立了某方钢管混凝土-钢梁平面框架结构的有限元模型.该框架模型共四跨,每跨跨度8 m,首层层高4.2 m,其余层层高均为3.6 m,共十二层.框架梁为热轧H型钢梁,钢材采用Q235钢,规格为HN700×300×13×24 mm;框架柱为方钢管混凝土组合柱,截面高宽 $b\times h=600\text{ mm}\times600\text{ mm}$,核心区混凝土强度等级为C30.1~5层柱的钢管壁厚为20 mm,6~12层为15 mm,方钢管采用Q345钢,计算中楼面恒载取4.5 Pa,活载取2.0 Pa,并折算成线荷载施加在梁上.2D有限元模型采用ABAQUS自带的混凝土损伤

塑性模型和钢筋随动强化模型;3D有限元模型的材料本构关系采用本文编制的混凝土和钢筋子程序.地震输入选用El-centro地震动(见图13),地面峰值加速度取 $PGA=0.62\text{ g}$,沿水平向单向输入.

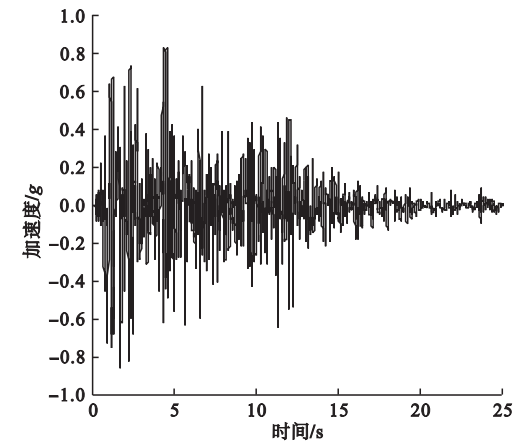


图 13 El-centro 地震动

Fig. 13 El-centro earthquake ground motion

首先,分别对2D和3D模型进行模态分析,结果列于表3中.

表 3 2D与3D模型前3阶振型对比

Table 3 Comparison for the first three order vibration modes between 2D and 3D frame models

振型	频率/Hz		相对误差 / %
	2D 模型	3D 模型	
一阶	1.619	1.555	3.95
二阶	4.946	4.756	3.84
三阶	8.746	8.418	3.75

由表3可以看出,其前3阶频率基本相

同,相对误差小于4%,表明两个模型的动力特性基本一致,可用于对比分析. 2D 与 3D 有限元模型在地震作用下的动力弹塑性时程对比分析如表 4、图 14 所示. 地震动输入前期,反应较小结构未进入非线性状态,两者的顶层位移、基底剪力时程曲线基本重合;而后期随着反应逐步加大结构进入强非线性状态,采用不同材料本构模型的计算结果差异开始显现,时程曲线出现一定差异. 与 2D 模型的计算结果相比,3D 模型的最大基底剪力和最大顶层位移均偏小,相对误差分别为 7.71% 和 3.55%;层间位移角曲线形状吻合良好,最大值均出现在第三层,3D 模型的最大层

间位移角略微偏大,相对误差为 15.38%,但总体计算结果较为理想. 总之,采用所编制材料子程序的 3D 模型与采用 ABAQUS 自带材料本构关系的 2D 模型的地震反应分析结果大体相同,笔者所编制的钢筋、混凝土材料子程序可用于钢筋混凝土结构非线性地震反应分析中,可以较好地反映地震作用下结构的动力反应特性.

表 4 结构响应对比

Table 4 The comparison of structural responses			
模型	层间位移角	顶层位移/m	基底剪力/kN
2D 模型	1/64	0.442	4 050
3D 模型	1/55	0.427	3 760

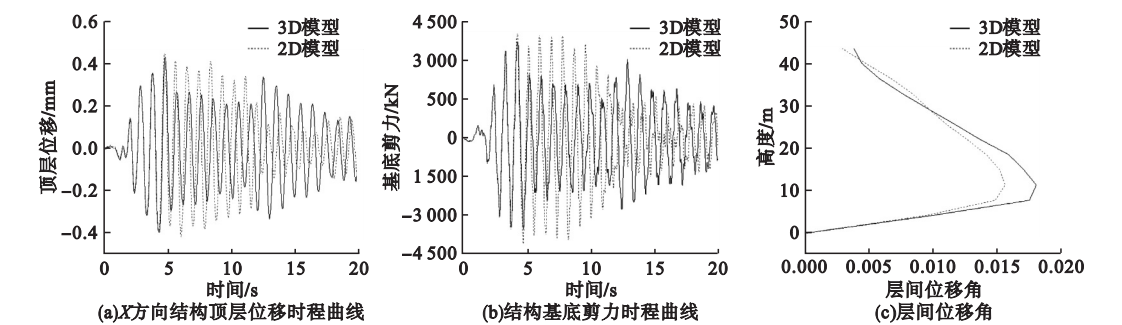


图 14 结构响应

Fig. 14 The structural responses

5 结 论

- (1)钢筋混凝土梁、柱构件的数值模拟结果与构件在真实受力状态下的力学行为基本吻合,表明所开发的子程序可以用于钢筋混凝土构件和结构的非线性分析.
- (2)通过对钢筋混凝土梁、柱构件的拟静力试验进行数值模拟,结果表明:不同钢筋加载规则计算得到的骨架曲线大致相同,但滞回捏拢行为存在差异. 在地震反应分析中,采用 ABAQUS 自带钢筋本构模型与真实情况差异较大,应考虑钢筋在加卸载过程中的刚度退化问题.
- (3)通过对地震作用下方钢管混凝土 - 钢梁平面框架结构的动力弹塑性分析表明,所开发的钢筋混凝土材料子程序可用于强震

作用下结构非线性分析.

参考文献

[1] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 2006.
(HU Yuxian. Earthquake engineering [M]. Beijing: Seismological Press, 2006.)
[2] 王强,宋雪迪,郝中华,等. 基于 ABAQUS 纤维梁单元的钢筋混凝土柱受力破坏全过程数值模拟[J]. 土木工程学报, 2014, 47 (12): 16 - 27.
(WANG Qiang, SONG Xuedi, HAO Zhong-hua, et al. Numerical simulation of failure process of RC columns based on fiber beam element in ABAQUS [J]. China civil engineering journal, 2014, 47 (12): 16 - 27.)
[3] 袁景,刘海卿,刘东. 强震作用下钢筋混凝土框架结构倒塌破坏的三维仿真分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30 (增刊 1): 115 - 119.
(YUAN Jing, LIU Haiqing, LIU Dong. Three dimensional simulation analysis of collapse of reinforced concrete frame structure under strong earthquake motion [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering,

- 2010,30(S1):115-119.)
- [4] 雷鲁.考虑剪切效应的大震下RC框架结构抗整体倒塌能力评估[D].兰州:兰州理工大学,2014.
(LEI Lu. Investigation on global collapse resistance capacity of RC frame subjected to severe earthquake considering shear effect [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.)
- [5] 林心洁.基于ABAQUS显式算法钢筋本构模型的开发与应用[D].南京:南京工业大学,2015.
(LIN Xinjie. Secondary development on the constitutive model of steel for explicit dynamic elements of ABAQUS [D]. Nanjing: Nanjing University of Technology, 2015.)
- [6] 陆新征,杨蔚彪,卢啸,等.倒塌分析在某500m级超高层建筑抗震设计中的应用[J].建筑结构,2015,45(23):91-97.
(LU Xinzhen, YANG Weibiao, LU Xiao, et al. Application of collapse analysis in seismic design of a super-tall building over 500m [J]. Building structure, 2015, 45(23): 91-97.)
- [7] 齐虎,李云贵,陈晓明,等.某带大悬挑钢桁架高层建筑的ABAQUS大震非线性分析[J].世界地震工程,2015,31(4):210-215.
(QI Hu, LI Yungui, CHEN Xiaoming, et al. Nonlinear analysis of a tall building with large cantilevered steel truss under expected rare earthquake through ABAQUS [J]. World earthquake engineering, 2015, 31(4): 210-215.)
- [8] 黄忠海,廖耘,王远利,等.某复杂超高层结构罕遇地震弹塑性时程分析[J].建筑结构,2011,41(3):40-44.
(HUANG Zhonghai, LIAO Yun, WANG Yuanli, et al. Elastic-plastic time-history analysis of a super high-rise building under rare earthquakes [J]. Building structure, 2011, 41(3): 40-44.)
- [9] 韩军,李英民,陈伟贤,等.ABAQUS三维梁单元的混凝土材料子程序二次开发[J].建筑结构,2011,41(5):111-114.
(HAN Jun, LI Yingming, CHEN Weixian, et al. Development of concrete material subroutines based on ABAQUS three-dimensional beam element [J]. Building structure, 2011, 41(5): 111-114.)
- [10] 尚兵,庄茁.基于ABAQUS梁单元的钢筋混凝土材料子程序[C]//北京力学学会第17届学术年会论文集.北京:[出版者不详],2011:416-422.
(SHANG Bing, ZHUANG Zhuo. The material subroutine of reinforced concrete based ABAQUS beam element [C]//Beijing Society of Theoretical and Application 17th Academic Annual Conference. Beijing: [s. n.], 2011: 416-422.)
- [11] 雷拓,刘伯权,刘锋.基于ABAQUS显式分析的梁单元材料模型开发应用[J].工程力学,2013,30(6):259-268.
(LEI Tuo, LIU Boquan, LIU Feng. Development and application of material constitutive models based on ABAQUS /explicit beam elements [J]. Engineering mechanics, 2013, 30(6): 259-268.)
- [12] 王强,朱丽丽,李哲,等.ABAQUS显式分析梁单元的混凝土、钢筋本构模型[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2013,29(1):56-64.
(WANG Qiang, ZHU Lili, LI Zhe, et al. Study on the constitutive model of concrete and steel for explicit dynamic beam elements of ABAQUS [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29(1): 56-64.)
- [13] FAGGELLA, M BARBOSA A R, CONTE J P, et al. Probabilistic seismic response analysis of a 3-D reinforced concrete building [J]. Structural safety, 2013, 44(2334): 11-27.
- [14] LÉGERON F, PAULTURE P, MAZAR J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J]. Structural engineering, 2005, 131(6): 946-954.
- [15] OHTORI Y, CHIRSTENSON R E, SPENCER J B F. Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings [J]. Journal of engineering mechanics, 2015, 130(4): 366-385.
- [16] ABAQUS Inc. ABAQUS user subroutines reference manual [M]. USA: Dassault Systems Simulia Corp, 2006.
- [17] LI Min, LI Hongnan. Effects of strain rate on reinforced concrete structure under seismic loading [J]. Advances in structural engineering, 2012, 15(3): 461-475.
- [18] 王德斌.考虑动力效应的钢筋混凝土柱抗震性能研究[D].大连:大连理工大学,2013.
(WANG Debin. Dynamic effect on seismic behavior of reinforced concrete column [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.)
- [19] 李俊华,李玉顺,王建民,等.型钢混凝土柱粘结滑移本构关系与粘结滑移恢复力模型[J].土木工程学报,2010,43(3):46-52.
(LI Junhua, LI Yushun, WANG Jianmin, et al. Bond-slip constitutive relation and bond-slip resilience model of shape-steel reinforced concrete columns [J]. China civil engineering journal, 2010, 43(3): 46-52.)
- [20] LI Hongnan, LI Min. Experimental and numerical study on dynamic properties of RC beam [J]. Journal of concrete research, 2013, 65(12): 744-756.