

基于 ABAQUS 的钢筋混凝土柱抗震数值模拟分析

程学斌, 马颖, 袁子淇

(华北水利水电大学 水利学院, 河南 郑州 450045)

摘要: 为了研究 ABAQUS 软件中实体单元和纤维梁单元在不同破坏模式下(RC)柱滞回性能数值模拟的适用性,从美国 PEER 数据库中收集了 9 根钢筋混凝土矩形截面柱的拟静力试验数据,柱试件分别发生了弯曲、弯剪或剪切不同模式的破坏。在 ABAQUS 中分别建立柱试件的实体单元模型和纤维梁单元模型并进行往复荷载作用下 RC 柱滞回性能的数值模拟,将模拟结果与试验数据进行了对比分析。结果表明:对于弯曲破坏 RC 柱,适合采用纤维梁单元模拟,而对于弯剪破坏和剪切破坏 RC 柱,基于实体单元的模拟结果与试验结果更为接近;纤维梁单元能够更准确地模拟 RC 柱滞回曲线的捏拢效应。

关键词: 钢筋混凝土柱; ABAQUS; 实体单元; 纤维梁单元; 滞回性能

中图分类号: TU375.3

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2020)06—0146—07

Seismic Numerical Simulation Analysis of Reinforced Concrete Columns Based on ABAQUS

CHENG Xuebin, MA Ying, YUAN Ziqi

(School of Water Conservancy, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, He'nan 450045, China)

Abstract: In order to assess the applicability of numerical simulation of hysteretic behavior of RC columns with solid element and fiber beam element in ABAQUS software under different failure modes. The pseudo-static test data of 9 reinforced concrete rectangular cross-section columns were collected from the PEER database in the United States. The column specimens were failed in different modes of flexure, flexure-shear or shear. Based on the force test data, the solid element model and the fiber beam element model of the specimen were established in ABAQUS to simulate the hysteretic performance of the RC column under the reciprocating load. The simulation results were compared with the test data. The results show that for flexure failure RC columns, fiber beam element simulation is suitable, while for flexure-shear failure and shear failure RC columns, the simulation results based on solid elements are closer to the test results, and fiber beam element can more accurately simulate the pinch effect of RC column hysteretic curve.

Keywords: reinforced concrete columns; ABAQUS; solid element; fiber beam element; hysteretic performance

在地震作用下,钢筋混凝土柱作为水工、桥梁、房屋等结构的主要竖向承重与水平抗力构件,承载着整个结构的竖向荷载和由地震引起的水平荷载。历次震害表明,钢筋混凝土柱破坏是结构震害的主要形式之一,不仅危及整个结构的安全,且影响震后救援工作的开展^[1]。地震作用下,钢筋混凝土柱通常会发生 3 种方式的破坏:弯曲破坏、弯剪破坏和剪

切破坏,因剪切破坏发生时呈完全脆性特征,抗震设计中需要予以避免。因此,对不同破坏模式下钢筋混凝土柱进行弹塑性分析显得尤为重要。而柱的滞回性能反映了结构或构件进入弹塑性状态后恢复力与位移之间存在的非线性关系,同时能够反映构件的强度、刚度、延性和耗能等力学特征,是抗震性能的综合体现。

收稿日期:2020-08-09

修稿日期:2020-09-01

基金项目:国家自然科学基金青年项目(51408223);国家自然科学基金面上项目(51679091;51979109)

作者简介:程学斌(1995—),男,江西上饶人,硕士研究生,研究方向为工程结构抗震。E-mail:lbjcheng@163.com

通讯作者:马颖(1982—),女,河南郑州人,博士,硕士生导师,主要从事水工、桥梁等工程结构抗震研究工作。

E-mail:maying198208@163.com

大型通用有限元软件 ABAQUS 具有丰富多样的单元类型和各种材料模型、优异的前后处理程序以及强大的非线性求解器,在结构构件的非线性分析中得到了广泛的应用^[2-3]。目前,在 ABAQUS 中用于模拟钢筋混凝土柱滞回性能的单元类型主要有三维实体单元和纤维梁单元两种。张耀庭等^[4]以 ABAQUS 为分析平台,基于纤维梁单元对发生弯曲破坏为主的钢筋混凝土柱建立数值分析模型,较好地模拟了钢筋混凝土柱的滞回性能。王强等^[5]通过 ABAQUS 中的显示求解模块 Explicit,基于纤维梁单元建模以较小的计算量准确描述钢筋混凝土柱在复杂受力条件下的非线性性态和破坏过程。许斌等^[6]基于 ABAQUS 中三维纤维梁单元和实体单元建立两尺度模型,对钢筋混凝土柱的动力滞回性能进行了数值模拟。

理论上,实体单元和纤维梁单元都能实现钢筋混凝土柱滞回性能的模拟。但是,对于发生不同破坏模式的钢筋混凝土柱,两种单元类型的模拟效果有一定区别。实体单元能够有效地模拟构件或结构的非线性行为,但存在计算量大、收敛性差的缺点。

纤维梁单元可以很好地模拟构件的弯曲变形和轴向变形,但是无法考虑剪切和扭转影响^[7]。为了研究 ABAQUS 软件中实体单元和纤维梁单元在不同破坏模式下钢筋混凝土柱滞回性能数值模拟的适用性,从美国 PEER 数据库中收集了 9 根钢筋混凝土矩形截面柱的拟静力试验数据,柱试件分别发生了弯曲、弯剪或剪切破坏。基于 ABAQUS 中的实体单元和纤维梁单元分别建立模型进行往复荷载作用下滞回性能的数值模拟,将模拟结果与试验结果进行了对比。分析了不同破坏模式钢筋混凝土柱的滞回性能和模拟单元的适用性,为模拟钢筋混凝土柱构件的滞回性能提供一定计算依据。

1 试验数据

从美国 PEER 数据库收集了 9 根不同破坏模式的钢筋混凝土矩形截面柱的拟静力试验数据。对于每根柱试件,PEER 提供了试件的几何尺寸、材料强度、加载方式、荷载-变形曲线和破坏模式等。试件的基本参数见表 1。

表 1 RC 柱试件基本参数表

编号	试件名称	尺寸 /mm × mm × mm	剪跨比	混凝土强度 f'_c /MPa	箍筋屈服强度 f_{yh} /MPa	纵筋屈服强度 f_y /MPa	轴力 N /kN	破坏模式
A1	Kanda et al. 1988, 85STC-2	250.0 × 250.0 × 750.0	3.000	27.9	506	374.0	184	弯曲
A2	Atalay and Penzien 1975, No. 3S1	305.0 × 305.0 × 1676.0	5.495	29.2	363	367.0	267	弯曲
A3	Azizinamini et al. 1988, NC-2	457.0 × 457.0 × 1372.0	3.002	39.3	454	439.0	1690	弯曲
A4	Sezen and Moehle No. 4	457.2 × 457.2 × 1473.2	3.222	21.8	476	434.4	667	弯剪
A5	Amitsu et al. 1991, CB060C	278.0 × 278.0 × 323.0	1.160	46.3	414	441.0	2632	弯剪
A6	Zhou et al. 1987, No. 204-08	160.0 × 160.0 × 320.0	2.000	21.1	559	341.0	432	弯剪
A7	Lynn et al. 1998, 3CMH18	457.2 × 457.2 × 1473.2	3.222	27.6	399.9	331.0	1512	剪切
A8	Arakawa et al. 1989, OA2	180.0 × 180.0 × 225.0	1.250	31.8	249	340.0	190	剪切
A9	Nagasaka 1982, HPRC10-63	200.0 × 200.0 × 300.0	1.500	21.6	344	371.0	147	剪切

2 基于实体单元的模拟

2.1 单元类型选择

ABAQUS 软件中实体单元类型种类居多,功能多样,应用广泛。本文根据模型的受力特点,同时为了计算的收敛性,混凝土采用线性减缩积分单元 C3D8R 模拟,柱中钢筋采用桁架单元 T3D2 来模拟。为了计算简便,钢筋与混凝土之间的相互作用通过软件提供的 Embedded Region 来实现。

2.2 混凝土本构模型

ABAQUS 软件为用户提供了 3 种混凝土本构模型来模拟混凝土材料在受力状态下的力学性能:

(1) 脆性开裂模型;(2) 弥散开裂模型;(3) 塑性损伤模型^[8]。其中,塑性损伤模型基于 Lubliner 等^[9]和 Lee 等^[10]模型建立,该模型通用于 ABAQUS 隐式和显示两大求解模块,可用于模拟混凝土在任意荷载作用下的受力情况,具有较好的收敛性^[11]。因此,本文在进行实体单元模拟时,混凝土本构模型选取混凝土塑性损伤(CDP)模型。

在 ABAQUS 软件中使用 CDP 模型时,需要用户自行输入混凝土的单轴拉压应力-应变关系,在本文中,根据我国《混凝土结构设计规范》^[12](GB 50010—2002)给出的混凝土单轴受压和受拉应力-应变曲线方程进行计算。受压应力-应变曲线如图

1 所示,计算公式见式(1)一式(3)。

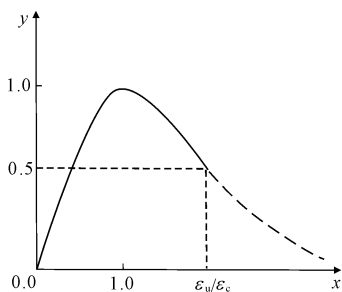


图 1 混凝土单轴受压应力 - 应变曲线

$$y = \begin{cases} \alpha_a x + (3 - 2\alpha_a)x^2 + (\alpha_a - 2)x^3, & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_d(x-1)^2 + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \quad (2)$$

$$y = \frac{\sigma}{f_c^*} \quad (3)$$

式中: α_a 、 α_d 为混凝土单轴受压应力 - 应变曲线上上升段和下降段的参数值,按规范要求取值; f_c^* 为混凝土单轴抗压强度; ε_c 为与 f_c^* 相对应的混凝土峰值压应变。

混凝土单轴受拉应力 - 应变曲线如图 2 所示,计算公式见式(4)一式(6)。

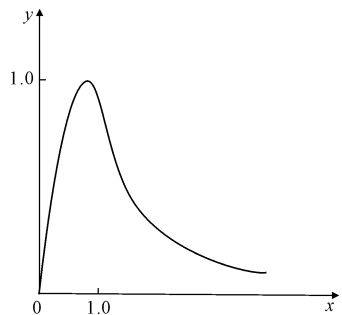


图 2 混凝土单轴受拉应力 - 应变曲线

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6, & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_l(x-1)^{1.7} + x}, & x > 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t} \quad (5)$$

$$y = \frac{\sigma}{f_t^*} \quad (6)$$

式中, α_l 为混凝土单轴受拉应力 - 应变曲线下降段的参数值,按规范要求取值; f_t^* 为混凝土单轴抗拉强度; ε_t 为与 f_t^* 相对应的混凝土峰值拉应变。

同时,在采用 CDP 模型模拟计算时,还需输入膨胀角、偏心率、抗压强度比(f_{t0}/f_{c0})、拉伸子午面

上和压缩子午面上的第二不变应力与不变量之比(k)及黏性系数 5 个参数,参数取值见表 2。

表 2 CDP 模型其它参数取值

膨胀角/(°)	偏心率	f_{t0}/f_{c0}	k	黏性系数
30	0.1	1.16	0.66667	0.005

2.3 钢筋本构模型

钢筋本构模型采用 ABAQUS 中自带的自动强化模型,本构模型如图 3 所示, E_s 为钢筋初始弹性模量, E 为钢筋屈服后的弹性模量,钢筋屈服后弹性模量 $E = \alpha E_s$, α 取 0.001, f_y 为钢筋屈服应力。

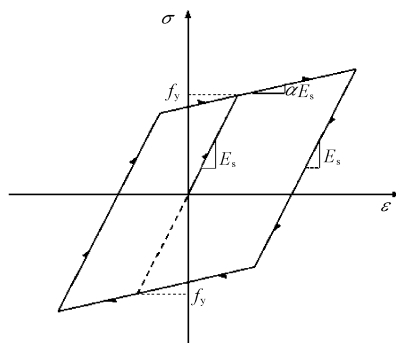


图 3 钢筋本构模型

2.4 损伤因子的计算

混凝土损伤因子 d 定义为弹性卸载时的弹性模量相对于初始切线弹性模量的折减^[13]。在 ABAQUS 的帮助文件中并没有对混凝土塑性损伤模型损伤因子取值的详细说明,我国现行的规范中虽然提供了损伤因子的计算公式,但是无法满足 ABAQUS 软件对数据检验的要求,因而常常会出现报错现象。基于此,国内外众多学者进行了大量研究,应用较为广泛的有张劲等^[14]公式法、Najar^[15]法、Mander 等^[16]法、Sidiroff^[17]能量法、Birtel 等^[18]公式。本文采用基于 Sidiroff 能量法所推导出的损伤因子计算方法,公式如下:

$$d = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_c \varepsilon}} \quad (7)$$

式中: E_c 为混凝土初始弹性模量; σ 为混凝土应力; ε 为混凝土应变。

3 基于纤维梁单元的模拟

3.1 单元类型选择

ABAQUS 软件中纤维梁单元的种类繁多,如 B22、B31、B32 等。每个单元截面划分的纤维数量以其积分点表示。图 4 所示为矩形截面纤维梁单元

截面积分点布置示意图。

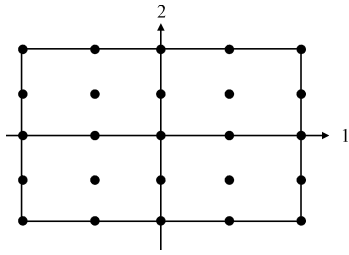


图 4 矩形截面纤维梁单元截面积分点布置示意图

本文选用的梁单元类型为 B31 单元,该单元基于 Timoshenko 梁理论构建,可以考虑剪切变形的影响,使用时需要定义一个额外的横向剪切刚度 * Transverse Shear Stiffness, 当不考虑剪切刚度影响时,往往指定剪切刚度为一个很大的数值即可。柱中纵向钢筋通过关键字 * rebar 进行添加。

3.2 混凝土本构模型

在采用纤维梁单元进行模拟时,ABAQUS 软件自带的三种混凝土本构模型中脆性开裂模型和塑性损伤模型并不适用,而弥散开裂模型虽然可以进行非线性分析,但是计算收敛性较差。因此,本节选择的混凝土单轴滞回本构模型为 Scott - Kent - Park 模型,该混凝土模型的受压骨架曲线采用 Scott 修正的 Kent - Park 模型^[19],示意图如图 5 所示,公式如下:

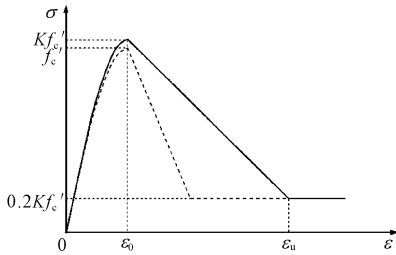


图 5 混凝土受压骨架曲线示意图

$$\sigma = \begin{cases} Kf'_c \left[2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] & , \quad \varepsilon \leq \varepsilon_0 \\ Kf'_c \left[1 - Z(\varepsilon - \varepsilon_0) \right] & , \quad \varepsilon_0 < \varepsilon \leq \varepsilon_u \\ 0.2Kf'_c & , \quad \varepsilon > \varepsilon_u \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\sigma_0 = Kf'_c$

$$\varepsilon_0 = 0.002K$$

$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_c}$$

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{s_h}} - 0.002K}$$

$$\varepsilon_u = 0.004 + 0.9\rho_s \left(\frac{f_{yh}}{300} \right) \quad \text{or} \quad \varepsilon_u = \varepsilon_0 + \frac{0.8}{Z}$$

式中: f'_c 为混凝土圆柱体轴心抗压强度; K 为约束增强系数; Z 为软化斜率系数; f_{yh} 为箍筋屈服强度; ρ_s 为体积配箍率; h' 为箍筋肢距; s_h 为箍筋间距。

受压加卸载采用 Yassin^[20] 提出的加卸载准则,如图 6 所示,所有卸载点的再加载路径都相交于 R 点 (ε_R, σ_R)。 R 点根据原点的切线刚度 E_c 和极限应力起点 (B 点) 的再加载刚度 E_{20} 确定。计算公式见公式(9)。

$$\varepsilon_R = \frac{0.2Kf'_c - E_{20}\varepsilon_{20}}{E_c - E_{20}}$$

$$\sigma_R = E_c \varepsilon_R \quad (9)$$

$$E_c = \frac{2Kf'_c}{\varepsilon_0}$$

式中: σ_R 和 ε_R 分别为 R 处的应力和应变。

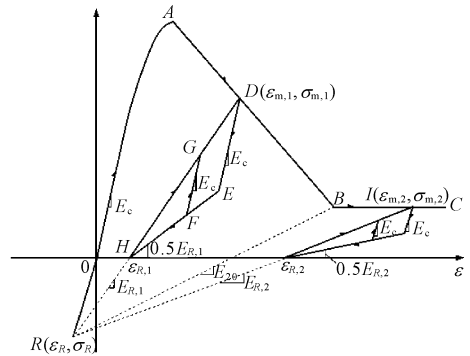


图 6 混凝土受压加卸载示意图

受拉骨架曲线采用双折线模型,加卸载示意图如图 7 所示。

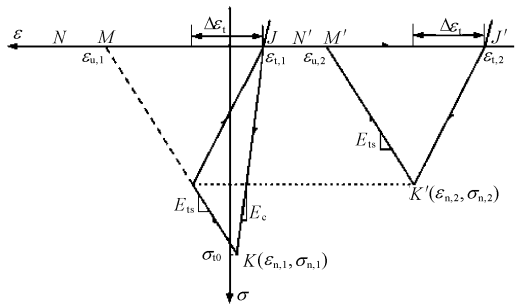


图 7 混凝土受拉加卸载示意图

3.3 钢筋本构模型

钢筋本构模型采用以 Clough 等^[21] 最大点指向型恢复力模型为原型的双折线强化模型,如图 8 所示。该模型可以较好的反映滞回曲线的捏缩效应。

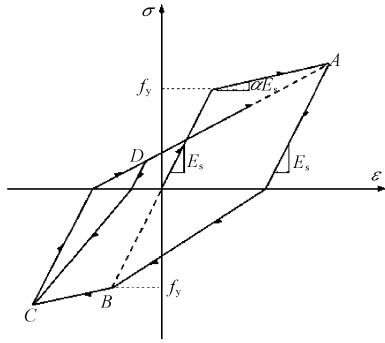


图 8 钢筋本构模型

4 模拟结果与试验结果对比分析

图 9、图 10、图 11 分别为三种破坏模式(弯曲、弯剪、剪切)下柱试件的实体单元和纤维单元模拟结果与试验结果对比图。表 3 为模拟结果与试验结果偏差分析。从图中可以看出,基于实体单元计算模拟所得的滞回曲线比较饱满,无法很好地表现出捏缩现象,这主要是因为 ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型无法模拟钢筋与混凝土之间的粘结滑移及混凝土的粘性。此外,对于剪跨比较大的 RC 柱,纤维梁单元的模拟结果与实验结果更为接近,如试件 A1、A2、A3,纤维梁单元模拟的偏差均值低于实体单

元模拟。对于剪跨比较小的 RC 柱,则实体单元的模拟结果与试验结果更为接近,如试件 A5、A6、A8、A9,实体单元模拟的偏差均值明显低于纤维梁单元模拟,偏差的变异系数大体为 0.5~0.8,说明所选 RC 柱试件模拟结果与试验结果的偏差的离散程度接近。

通过对比三种破坏模式的 RC 柱试件的模拟结果,还可以看出,对于发生弯曲破坏的 RC 柱,基于实体单元模拟时,最大承载力的模拟值相对于实验值偏低,如图 9(a)所示。而采用纤维梁单元的模拟结果与试验结果较为吻合,见图 9(b)。对于发生弯剪破坏和剪切破坏的 RC 柱,采用实体单元模拟时,最大承载力和刚度都与试验结果更为接近,如图 10(a)和图 11(a)所示。而采用纤维梁单元模拟得到的最大承载力和刚度值相对于试验值偏高,见图 10(b)和图 11(b)。此外对于弯曲破坏柱,纤维梁单元模拟的偏差均值低于实体单元模拟;而对于弯剪破坏柱和剪切破坏柱,实体单元模拟的偏差均值明显低于纤维梁单元模拟。由此可以知道,纤维梁单元适用于模拟发生弯曲破坏为主的 RC 柱的滞回曲线,实体单元适用于模拟发生弯剪破坏和剪切破坏的 RC 柱的滞回特性。

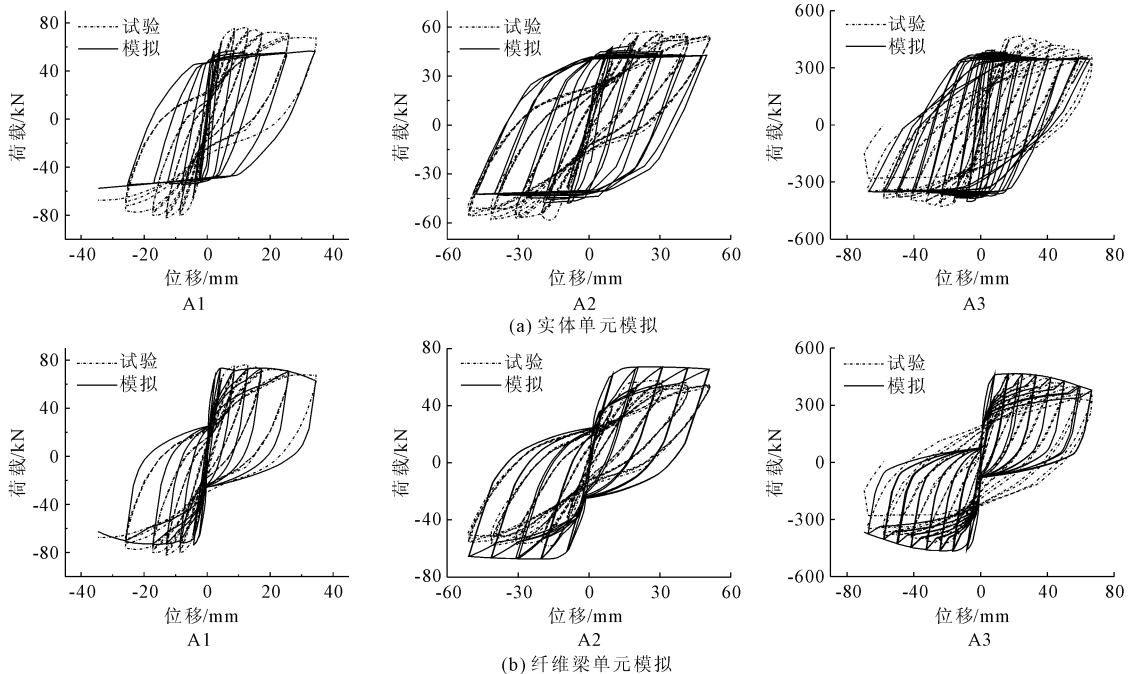


图 9 弯曲破坏柱模拟结果与试验结果对比

对比三种破坏模式 RC 柱的滞回曲线,可以看出,弯曲破坏 RC 柱试件的滞回曲线总体上呈饱满梭形状,滞回环包围面积大,表明试件耗能能力强,

具有良好的抗震性能;弯剪破坏 RC 柱试件的滞回曲线开始较为饱满,随后出现捏拢现象,刚度退化明显,具有一定的耗能能力;剪切破坏 RC 柱试件的滞

回曲线捏拢明显,干瘪呈 S 形,滞回环包围面积小, 研究的结论,以数值模拟再次予以证明。
试件耗能能力弱,抗震性能差。这些规律符合试验

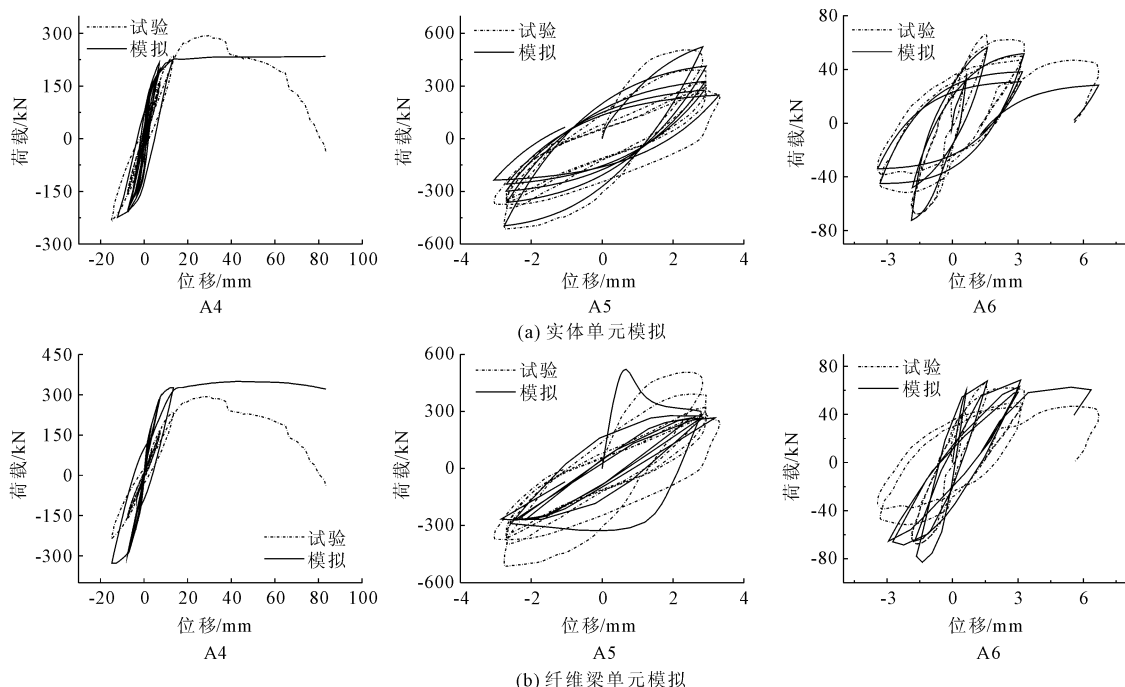


图 10 弯剪破坏柱模拟结果与试验结果对比

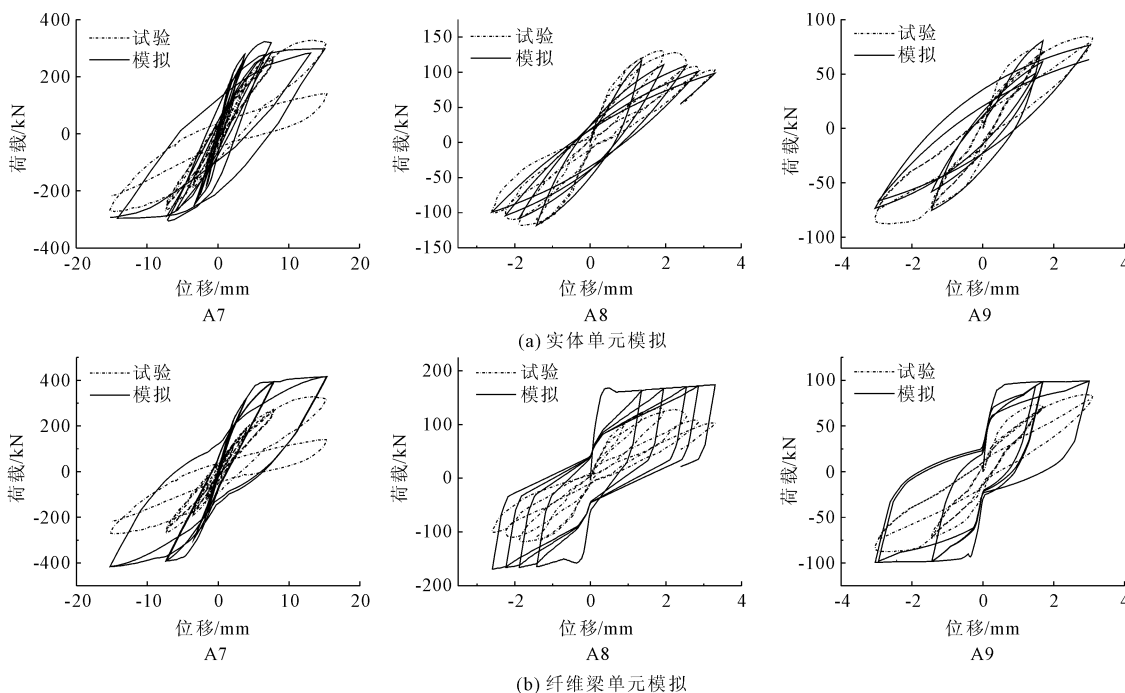


图 11 剪切破坏柱模拟结果与试验结果对比

5 结 论

本文通过采用 ABAQUS 中实体单元和纤维梁单元对三种不同破坏模式(弯曲、弯剪、剪切)的钢筋混凝土柱进行数值模拟,可以得到以下结论:

(1) 基于实体单元对 RC 柱进行数值模拟,无法很好地表现出滞回曲线的捏拢效应,主要是因为混凝土塑性损伤模型无法模拟钢筋与混凝土之间的粘结滑移以及混凝土的粘性等情况,因此对构件性能 的准确模拟分析还存在不足。

(2) 纤维梁单元适用于剪跨比较大的 RC 柱的建模, 实体单元更适合模拟剪跨比较小 RC 柱的滞回特性。

(3) 对于发生弯曲破坏的 RC 柱, 适合采用纤维梁单元模拟, 而对于弯剪破坏和剪切破坏 RC 柱, 基于实体单元的模拟结果与试验结果更为接近。

参考文献:

- [1] 马 颖. 钢筋混凝土柱地震破坏方式及性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [2] 陈 叶, 刘 忠, 李 佩, 等. L 形混凝土偏心受压柱力学性能数值分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3): 167-171, 225.
- [3] 胡海燕, 刘 忠, 陈 根, 等. 十字形钢筋混凝土轴心受压柱三维非线性数值模拟分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(2): 60-64.
- [4] 张耀庭, 程庆乐, 左 鸿, 等. 钢筋混凝土柱的拟静力试验及其数值分析[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(4): 27-31.
- [5] 王 强, 宋学迪, 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): 16-26, 81.
- [6] 许 斌, 王治原, 陈洪兵. 钢筋混凝土柱动力滞回性能两尺度数值模拟[J]. 建筑科学与工程学报, 2017, 34(3): 16-23.
- [7] 杨 刚, 许 斌, 陈洪兵. 钢筋混凝土柱破坏过程扩展有限元数值模拟[J]. 应用力学学报, 2018, 35(3): 602-608, 693.
- [8] Hibbit, Karlsson, Sorensen. ABAQUS/Standard User Subroutines Reference Manual[M]. USA: the Pennsylvania State University, 1998: 1-200.
- [9] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model of concrete[J]. International Journal of Solids and Structures, 1989, 25(3): 299-326.
- [10] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [11] 姚方宝, 关 群, 王浦东. 基于 ABAQUS 塑性损伤模型损伤因子的仿真分析[J]. 结构工程师, 2019, 35(5): 76-81.
- [12] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [13] 聂建国, 王宇航. ABAQUS 中混凝土本构模型用于模拟结构静力行为的比较研究[J]. 工程力学, 2013, 30(4): 59-67, 82.
- [14] 张 劲, 王庆扬, 胡守营, 等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008(8): 127-130.
- [15] Najjar J. Continuous Damage of Brittle Solids[M]. Continuous Damage Mechanics Theory and Application. Springer Vienna, 1987: 233-294.
- [16] 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.
- [17] Sidiroff F. Description of Anisotropic Damage Application to Elasticity[M]. Physical Non-Linearities in Structural Analysis. Springer Berlin Heidelberg, 1981: 237-244.
- [18] Birtel V, Mark P. Parameterized finite element modeling of RC[C]//ABAQUS User's Conference, 2006.
- [19] Kent D C, Park R. Flexural members with confined concrete[J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1971, 97(ST7): 1969-1990.
- [20] Yassin M H M. Nonlinear analysis of prestressed concrete structures under monotonic and cyclic loads[D]. University of California. Berkeley, California, USA, 1994.
- [21] Clough R W, Johnstn S B. Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements[C]//Proceeding of Japan Earthquake Engineering Symposium, Tokyo, Japan, 1966.