

考虑嵌固支座约束的钢筋混凝土柱数值分析研究

赵 航^{1,4}, 王秋维^{1,2,3}, 史庆轩^{1,2,3}

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055;
3. 西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055; 4. 陕西工业职业技术学院 土木工程学院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 嵌固支座对钢筋混凝土柱根区域具有一定约束作用, 而传统纤维单元中并未考虑此约束, 对以弯曲破坏为主的钢筋混凝土柱进行数值模拟, 发现不考虑嵌固支座约束时柱的承载力较试验值低, 且轴压比越大偏低越多. 分析混凝土强度和峰值应变对柱正截面抗弯承载力的影响, 揭示嵌固支座约束对承载力的提高机理, 分别采用修正系数 K_1 、 K_2 、 K_3 反映约束作用对破坏控制截面位置、混凝土强度和峰值应变的影响, 建立了修正后的钢筋混凝土柱纤维模型, 计算与试验结果吻合良好, 表明所提方法有较好的适用性.

关键词: 嵌固支座约束; 纤维单元; 钢筋混凝土柱; 抗震性能; 数值模拟; 轴压比

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)06-0906-08

Numerical analysis on reinforced concrete columns with restraint of support

ZHAO Hang^{1,4}, WANG Qiuwei^{1,2,3}, SHI Qingxuan^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China;

3. Key Lab of Structural Engineering and Earthquake Resistance, Ministry of Education(XAUAT), Xi'an 710055, China;

4. School of Civil Engineering Shaanxi Polytechnic Institute, Shaanxi Xianyang 712000, China)

Abstract: The support has a certain constraint effect on the root region of the reinforced concrete column, which is not considered by the traditional fiber element. The numerical simulation of the reinforced concrete column with bending failure is carried out, and it is found that the simulated bearing capacity of the column is lower than the test value, and the larger the axial compression ratio is, the lower it is. It is revealed that the restraint of support improve the bearing capacity by analyzing the influence of concrete strength and peak strain on column flexural bearing capacity of normal section, the parameters K_1 , K_2 , K_3 , are used respectively to reflect the effect of restraint of support on damage control section, the influence of concrete strength and peak strain, the modified fiber reinforced concrete column model is established, the calculation results coincide with the experiment, and shows that the proposed method has better applicability.

Key words: restraint of support; fiber element; reinforced concrete column; seismic performance; numerical simulation; axial compression ratio

目前, 纤维单元已被广泛的应用在钢筋混凝土结构体系的研究与分析之中, 在有限元软件 SAP2000、PERFOM3D、OpenSEES 等中均有相应的单元模型, 单元模型基于平截面假定, 理论清晰明确, 相较于实体单元, 在保证精度前提下, 可大大节约计算成本.

常用纤维单元模型主要分为集中塑性模型和

分布塑性模型两种, 其中分布塑性模型采用数值积分方式获取单元刚度和截面内力, 相较于集中塑性模型能够更加合理的考虑压弯耦合. 分布塑性模型又分为基于位移法插值和力法插值两种形式, 赫中营^[1]对力法单元进行理论分析, 阐述了等效塑性铰长度与积分点数量、单元长度的关系, 并通过一组单墩循环推倒试验进行了验证, 文献

收稿日期: 2020-11-22

修改稿日期: 2022-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878543, 51878540); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(20JS078); 陕西工业职业技术学院科研计划项目(2021YKYB-066)

第一作者: 赵 航(1990—), 男, 博士生, 主要从事(超)高层建筑研究. E-mail: zhaohang800@163.com

通信作者: 王秋维(1982—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事钢-混凝土组合结构研究. E-mail: wqw0815@126.com

[2-4]基于纤维单元模拟弯曲破坏为主的钢筋混凝土柱,均取得与试验接近的模拟结果.然而,采用数值积分求取单元效应,积分点对应的各个截面材料特性相同,忽略了嵌固支座约束作用对根部区域混凝土的影响,文献[5-7]的试验现象中表明,破坏从柱角开始,柱中部破坏轻于角部,破坏起始位置往往非柱最底部,且最终破坏形态往往呈锥型,如图1所示.这些试验现象反映了嵌固支座对柱根区域混凝土有不同程度的约束,这在文献[8-9]中也得到了验证.采用数值积分的纤维模型是不考虑嵌固支座约束作用的影响,这将造成不同程度的精度降低.上述文献选取模拟对象多以低轴压比柱子为主,而本文模拟结果表明嵌固支座约束影响随轴压比增大而增大,致使低轴压比下嵌固约束问题易被忽略,后文将进一步说明.

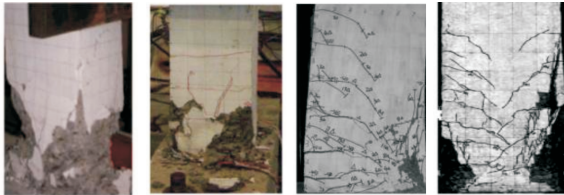


图1 柱根破坏现象^[5-7]

Fig. 1 Failure phenomenon of column root

本文采用纤维单元对45根弯曲破坏为主的钢筋混凝土柱进行数值模拟,分析嵌固支座影响与轴压比关系,基于混凝土受压断裂能 G_{fc} 的概念^[10],通过修正系数 K_1 、 K_2 、 K_3 在纤维单元中考虑嵌固支座约束作用对柱破坏控制面的位置、混凝土强度及混凝土峰值应变的影响.

1 模型建立

1.1 材料本构关系

1.1.1 钢筋

为合理考虑钢筋屈曲、断裂以及循环加载下强度和刚度的退化,模型采用OpenSEES中Reinforcing Steel模型,如图2所示,图中 f_y 、 f_{su} 为钢筋屈服强度及极限强度, E_s 、 E_{sh} 为初始切线模量和初始强化模量, ϵ_{sh} 、 ϵ_{su} 为初始强化应变和极限强度应变.

1.1.2 混凝土

为合理考虑混凝土裂缝闭合、箍筋约束的有效约束面积、箍筋间距、配筋率、混凝土开裂等因素影响,混凝土材料模型采用OpenSEES中concrete07模型,如图3所示.该模型是Waugh

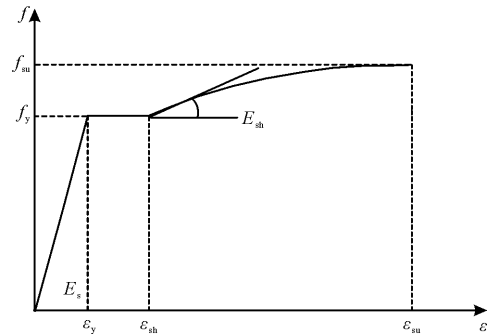


图2 Reinforcing Steel模型

Fig. 2 Reinforcing Steel Model

在Chang & Mander模型^[11]的基础上采用三折线形式对滞回规则进行了改进,提高了模型收敛性.

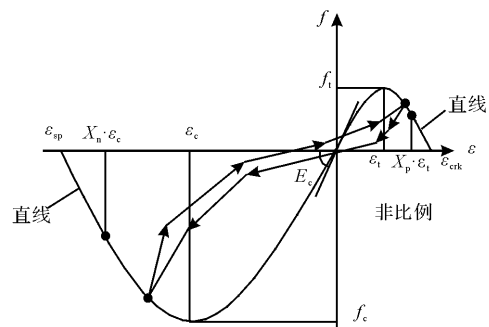


图3 Concrete07模型

Fig. 3 Concrete07 Model

混凝土concrete07本构方程采用公式为

$$f = \frac{f_c x r}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

式中: f_c 为混凝土峰值应力, x 为混凝土应变与峰值应变的比值, r 为曲线形状影响系数.其余参数取值见文献[12].

1.2 粘结滑移

通过Zhao和Sritharan^[13]在OpenSEES中添加的Bond_SP01单元模型,并与零长度单元相结合来考虑粘结滑移现象,由于钢筋采用应力与滑移的本构关系,而混凝土单元采用应力应变本构关系,模拟过程中混凝土会有应变失真,采用Leborgne M R^[14]等给出的峰值应变放大系数 K 促使应变渗透与实际情况接近.

1.3 单元及积分点选取

柱单元选取OpenSEES中Force-Based Beam-Column单元,选用2个单元模拟钢筋混凝土悬臂柱,数值积分采用Gauss-Lobatto积分法,其计算精度为 $2N-3$ (N 为积分点数目),2单元均采用3积分点保证弹性阶段为精确解,端部积分点权系数为1/6,如图4所示.基于公式(2)求解等效塑性性较长度 L_p ,取单元长度1/6 L 为等效塑性性较长度 L_p ,进而确定第1个单元长度,剩余部分则为第2

个单元长度。

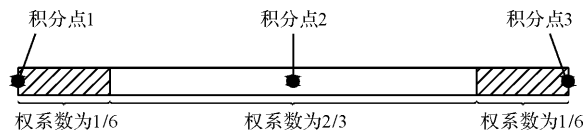


图4 Gauss-Lobatto积分(3点)

Fig. 4 The Gauss-Lobatto integral method(3 point)

等效塑性铰长度^[17]计算公式为

$$L_p = 0.08L + 0.022f_y d_b \quad (2)$$

式中: L 为反弯点到弯矩最大截面的距离, 悬臂柱中可视作柱高度; f_y 为纵筋屈服强度; d_b 为纵筋直径。

2 模拟及结果分析

2.1 模拟试件

选取文献[5-7, 15-20]中 45 根钢筋混凝土试件

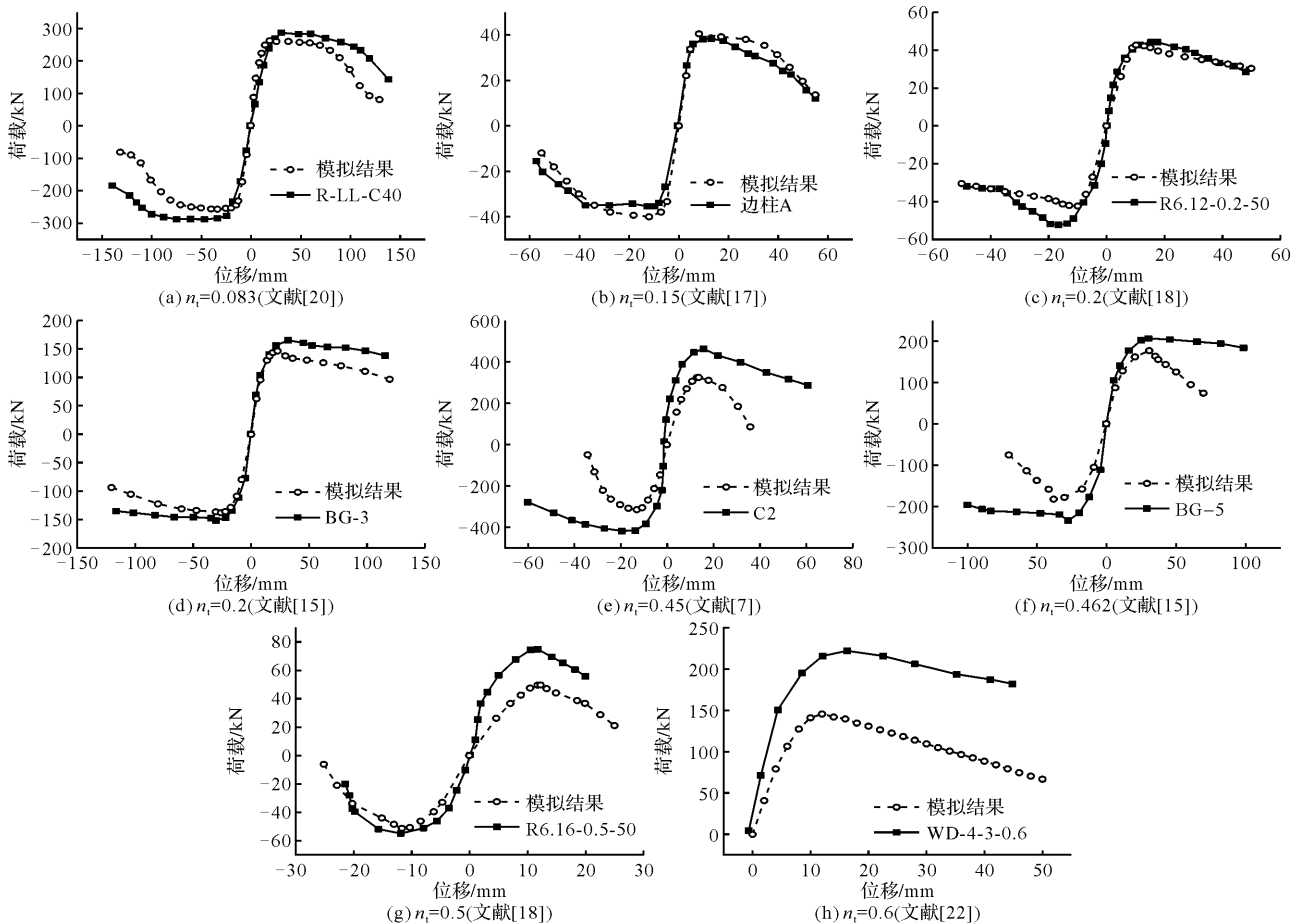


图5 轴压比 $n_t = 0 \sim 0.6$ 时荷载-位移骨架曲线

Fig. 5 Load-displacement skeleton curve with axial compression ratio $n_t = 0 \sim 0.6$

由图可知, 水平承载力峰值和延性的计算值与试验值差异随着轴压比增大而逐渐增大, 当轴压比 $n_t = 0 \sim 0.3$ 时, 峰值荷载和延性偏差在 15% 以内, 当轴压比 $n_t = 0.3 \sim 0.6$ 之间时, 误差最大为 34.7%。

进行模拟, 由于支座嵌固作用主要是对柱端塑性铰区受压膨胀的约束, 为分析此种嵌固影响, 所选对象以柱端塑性铰区弯曲破坏为主, 试件剪跨比 λ 为 3.0~5.75。试件其余基本信息为: 混凝土轴心抗压强度 f_{ck} 为 22.9~69.6 MPa; 试验轴压比 n_t 为 0.05~0.6; 钢材屈服强度 f_y 为 365.2~582 MPa。模拟采用与试验相同的加载方式。

2.2 荷载-位移骨架曲线

荷载-位移骨架曲线可反映试件水平峰值承载力以及试件延性特征。对所选 45 根钢筋混凝土试件进行模拟, 以荷载-位移骨架曲线为主要分析对象进行对比分析, 由于试件数量较多, 按轴压比由低到高选取部分具有代表性的试件模拟结果, 与试验结果对比如图 5 所示。

图 6 为 45 根钢筋混凝土柱峰值荷载模拟值 P_s 与试验值 P_t 对比, 结果亦表明模拟精度与轴压比有较明显的线性关系, 随着轴压比增大, 模拟精度下降。

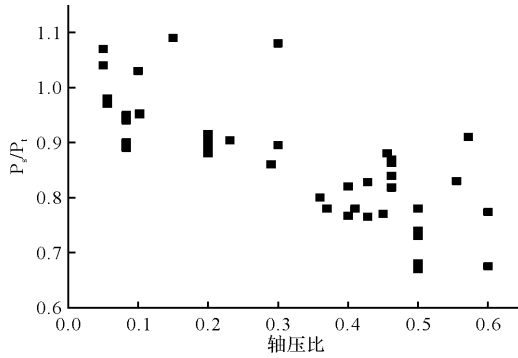


图6 水平峰值荷载模拟值与试验值对比

Fig. 6 Comparison of simulated value and test value for horizontal peak load

2.3 误差机理分析

以轴压比 0.083 和 0.45 的试件 R-LL-C40 和 C2 为例进行说明,其骨架曲线对比,如图 5(a)和(e)所示。

现假定两试件控制截面混凝土轴心抗压强度和混凝土峰值应变均提升 1.3 倍,本构曲线的形状系数 r 保持不变,仅考查混凝土强度和峰值应变的提高带来的影响,则与原混凝土强度和峰值应变下模拟结果对比如图 7 所示。由图可知混凝土强度和峰值应变的提升在高轴压比下的 C2 试件中影响更加明显。

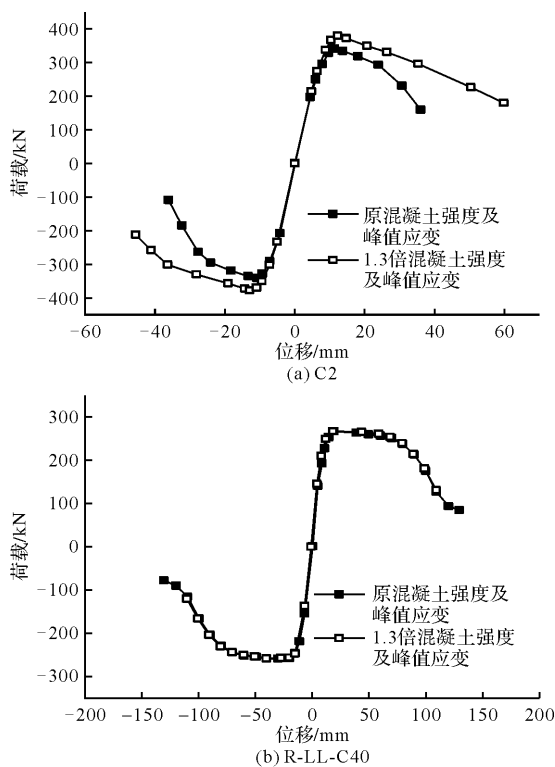


图7 荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement curve

为了表述方便,称原混凝土强度和峰值应变为原参数,提取控制截面钢筋条带和混凝土条带

应力,并计算受压混凝土合力作用点位置,对比原参数和 1.3 倍原参数时合力作用点位置变化,截面受力如图 8 所示,在 C2 试件中,当取 1.3 倍原参数时,受压混凝土合力作用点位置向边缘移动 13.17 mm,约占截面宽度 3%,且边缘纵向受拉钢筋屈服,中部钢筋得到进一步发展,均增大了截面的抗弯承载力;在 R-LL-C40 中,受压混凝土合力作用点位置向边缘移动 5.88 mm,约占截面宽度 0.98%,且纵向受拉钢筋已屈服,截面抗弯承载力提高幅度很小。高轴压比下受压混凝土面积较大,混凝土强度对受压混凝土合力作用点位置影响更大,进而对截面抗弯承载力影响更大。当不计嵌固支座约束作用的影响,采用纤维单元进行模拟分析时,在低轴压比时承载力和延性的模拟结果偏差较少,高轴压比时偏差较大。

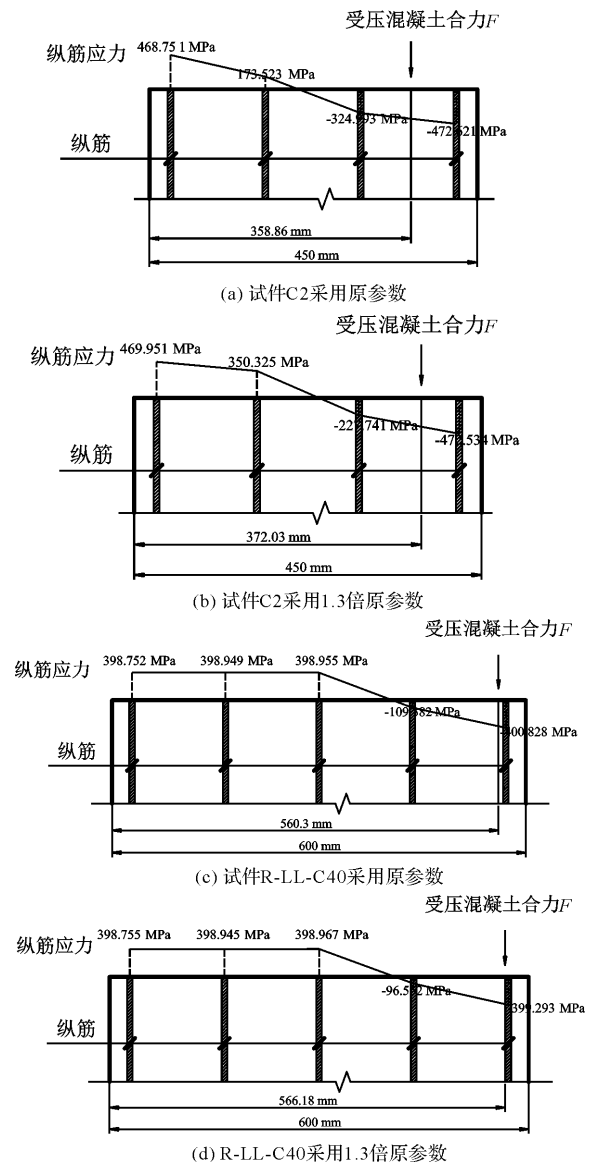


图8 峰值荷载时纤维截面受力分布

Fig. 8 Stress distribution of fiber section under peak load

支座嵌固作用主要影响混凝土受压区,柱根形成锥形破坏,轴压比越大受压面积越大,锥形区域越大,相应破坏最严重位置越靠上,即控制截面上移,水平荷载力臂减小,水平峰值荷载则更大一些。

3 模型修正

由上述分析可知,要想获取合理的模拟结果,需确定合理的破坏控制面位置、破坏控制面混凝土强度和延性来赋予混凝土,使相应积分点截面合理模拟破坏控制面性能。现从此三因素出发,进行调整。

3.1 破坏控制面位置

由试验现象可知,嵌固支座约束作用会导致破坏控制截面位置从柱根部上移,轴压比越大,破坏控制面上移越多。为了确定嵌固支座约束对破坏控制面位置的影响,采用实体单元模拟混凝土,采用混凝土三向应力下屈服准则,结合流动法则、硬化法则和滞回规则,可合理考虑单元体之间互相约束的影响^[21]。选择峰值荷载对应受压混凝土塑性变形最大处,作为破坏控制截面。为验证模型的可靠性,选用 C3D8R 单元模拟混凝土,采用 T3D2 单元模拟钢筋,混凝土本构采用混凝土损伤模型 (Concrete Damaged Plasticity), 钢筋本构采用双折线模型,对 C2 和 R-LL-C40 构件进行模拟,并对比荷载-位移骨架曲线如图 9、图 10 所示,结果表明实体单元可有效模拟钢筋混凝土柱性能。为考虑不同柱截面尺寸的影响,定义控制截面距柱底距离与柱受力方向截面尺寸比值为 K_1 , 对前述 45 根钢筋混凝土柱试验进行有限元模拟,结果表明控制截面位置与轴压比具有明显的线性关系,对轴压比与 K_1 值关系进行拟合,见图 11。

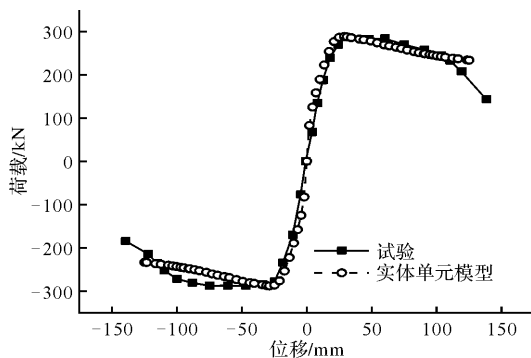


图 9 R-LL-C40 荷载-位移骨架曲线

Fig. 9 Load-displacement curve of R-LL-C40

拟合公式为

$$K_1 = 0.02481 + 0.80421 \times n_t \quad (3)$$

式中: n_t 为试验轴压比。

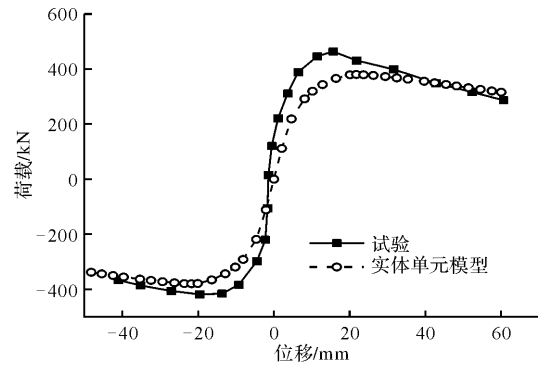


图 10 C2 荷载-位移骨架曲线

Fig. 10 Load-displacement curve of C2

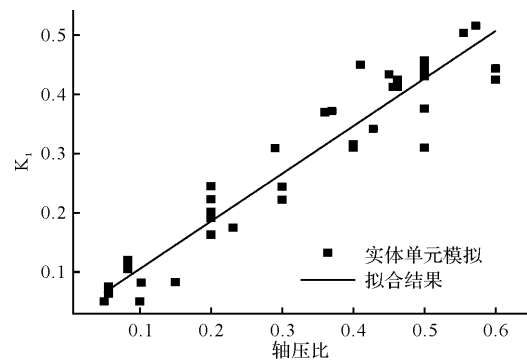


图 11 控制面位置拟合

Fig. 11 Control surface position fitting

3.2 控制界面混凝土强度

在 Force-Based Beam-Column 单元中,采用力插值的形式,柱承载力由控制截面材料强度决定。由于缺乏混凝土材料在嵌固支座约束作用下的性能试验,采用试验水平峰值荷载推导截面峰值弯矩,如公式(4)。由截面弯矩试算控制截面所需混凝土强度。在此设 K_2 为混凝土强度提高系数,用来反映约束作用对混凝土强度的增强部分。控制截面核心区混凝土强度则取为 $f_{cc} \times (1 + K_2)$, 其中 f_{cc} 为 mander 模型计算核心区约束混凝土强度。由于保护层混凝土位处边缘,约束作用影响不大,在此不予考虑。混凝土强度除了嵌固支座约束作用影响外,还受配箍特征值影响。通过反复试算,并对轴压比、配箍特征值与混凝土强度提高系数 K_2 的关系进行拟合,如图 12 所示,拟合公式为式(5)。

$$M = F \times H + N \times \Delta \quad (4)$$

$$K_2 = -0.01066 - 0.03279\lambda + 0.7612n_t \quad (5)$$

式中: H 为水平荷载到控制截面的距离; Δ 为轴力到控制截面轴心的距离; λ 为配箍特征值; N 为试验轴压力; n_t 为试验轴压比,最大值取 0.6,当

K_2 小于 0 时, 取为 0.

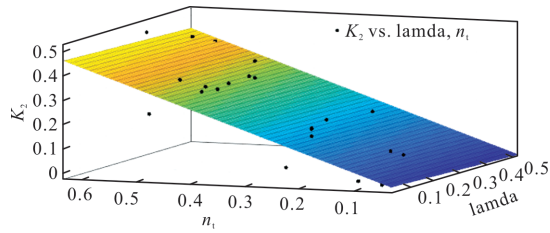


图 12 混凝土峰值应力提高系数拟合

Fig. 12 Improvement coefficient fitting of concrete peak stress

3.3 控制截面混凝土峰值应变

在 Force-Based Beam-Column 单元中, 采用力插值的形式, 结果不能随积分点数目增加而收敛于单一解, 分布塑性状态退化为集中塑性状态. 为此 Coleman and Spacone^[10] 发展了一种考虑混凝土受压断裂能 G_{fc} 的正则化方法, 如图 13 所示, 以混凝土应力-应变曲线下下降段的耗能表示等效塑性铰区混凝土条带单位长度耗能, 取控制截面积分点权系数对应柱中长度为塑性铰长度 L_p , 基于 Kent-Park 模型调整混凝土极限应变 ϵ_u , 以此考虑塑性铰区塑性发展对柱延性的影响.

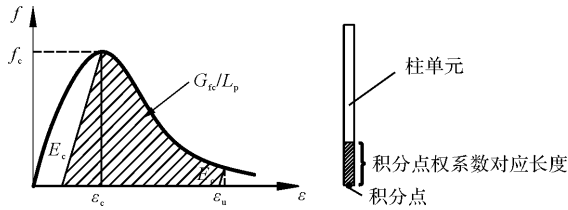


图 13 单位长度混凝土受压断裂能 G_{fc}/L_p

Fig. 13 Fracture energy of concrete unit length under compression

采用力法纤维单元模拟时, 混凝土受压断裂能 G_{fc} 是影响柱延性的主要因素, 在 Mander 模型中, 下降段耗能主要由形状参数 r 确定, r 由混凝土峰值强度和峰值应变确定, 则受压断裂能的取值可由混凝土峰值强度和峰值应变确定, 混凝土峰值应力由公式(5)确定后, 只需确定的混凝土峰值应变, 即可确定受压断裂能. 在此定义 K_3 为混凝土峰值应变提高系数用以考虑嵌固支座约束作用对混凝土峰值应变的提高, 则调整后核心区混凝土峰值应变与原核心区约束混凝土峰值应变之比为 $1+K_3$.

由于受压断裂能 G_{fc} 与混凝土强度和轴压比相关, 即峰值应变与混凝土强度和轴压比相关, 并对混凝土强度 f_{cc} 、试验轴压比 n_t 与混凝土峰值应变提高系数 K_3 的关系进行拟合, 如图 14 所示, 可得.

$$K_3 = -0.039\,94 + 0.001\,135f_{cc} + 0.342\,8n_t \quad (6)$$

式中: f_{cc} 为调整后混凝土峰值强度; n_t 为试验轴压比, 最大值取 0.6, 当 K_3 小于 0 时, 取为 0.

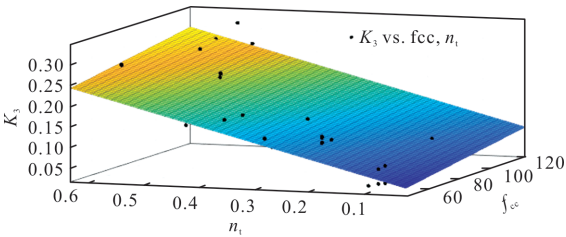


图 14 混凝土峰值应变提高系数拟合

Fig. 14 Increasing coefficient fitting of concrete peak strain

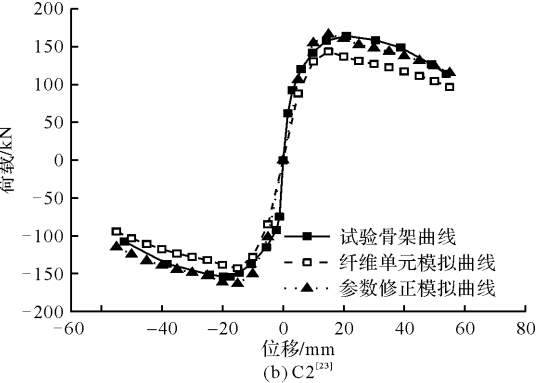
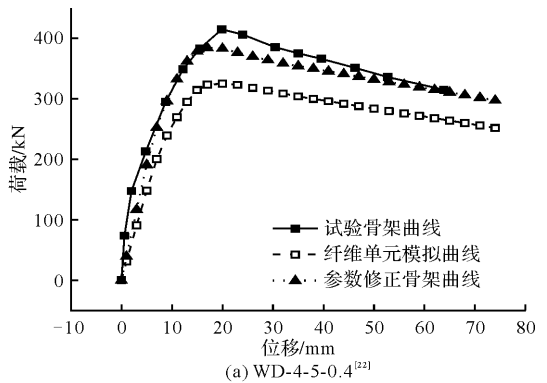
3.4 修正系数验证

为验证修正系数的合理性, 选择文献[22-24] 中 WD-4-5-0.4、C2、RC1 构件进行模拟, 混凝土轴心抗压强度 f_{ck} 为 22.3~30 MPa, 纵筋屈服强度 f_y 为 424~526 MPa, 试验轴压比 n_t 为 0.35~0.4, 各构件的修正系数取值如表 1 所示, 采用与试验相同加载方式, 模拟荷载-位移骨架曲线结果如图 15 所示.

表 1 修正系数取值

Tab. 1 Correction parameter values

构件	高度调整 系数 K_1	应力提高 系数 K_2	应变提高 系数 K_3	轴压比 n_t
WD-4-5-0.4	0.34	0.285	0.180	0.4
C2	0.3	0.251	0.151	0.35
RC1	0.45	0.362	0.208	0.5



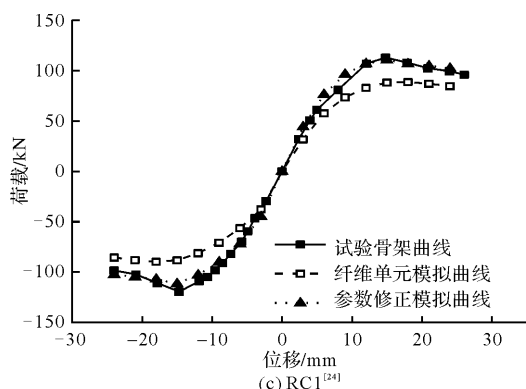


图15 骨架曲线的对比结果

Fig. 15 Comparison results of skeleton curves

模拟结果表明, 经过对控制截面位置的调整, 以及控制截面混凝土材料性能的修正, 采用纤维单元可获得更合理的模拟效果。

4 结论

(1)从钢筋混凝土柱破坏现象可发现, 柱嵌固支座对根部具有一定约束作用, 会提高柱根区域混凝土的强度和延性。不考虑嵌固支座约束影响时, 水平荷载峰值和延性模拟结果整体偏低, 且随轴压比增大, 偏差增大, 反映了控制面混凝土按轴心抗压强度和峰值应变取值较真实值偏低;

(2)通过柱正截面抗弯承载力分析, 混凝土强度和峰值应变的改变在高轴压比下会引起截面抗弯承载力明显的变化, 低轴压比下变化较小, 嵌固支座约束作用一定程度提高控制面混凝土强度和峰值应变, 不考虑约束影响时, 高轴压比下偏差较大, 低轴压比下偏差较小, 约束作用影响易被忽略;

(3)基于实体单元和纤维单元进行多次试算, 并与实际荷载位移曲线进行比对, 给出相应的修正系数 K_1 、 K_2 、 K_3 来调整破坏控制截面位置、混凝土强度和峰值应变, 建立修正后的钢筋混凝土柱纤维模型, 结果表明该方法可获得更加合理的模拟结果。

参考文献 References

- [1] 赫中营, 叶爱君. 力法非线性梁柱单元的合理单元长度划分[J]. 工程力学, 2014, 31(7): 178-184.
HE Zhongying, YE Aijun. Reasonable discrete element length of force-based nonlinear beam-column elements [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(7): 178-184.
- [2] 陈学伟, 韩小雷, 孙思为. 三种非线性梁柱单元的研究及单元开发[J]. 工程力学, 2011, 28(S1): 5-11.
CHEN Xuwei, HAN Xiaolei, SUN Siwei. Research

- and development of three nonlinear beam-column elements[J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(S1): 5-11.
- [3] 李贵乾. 钢筋混凝土桥墩抗震性能试验研究及数值分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
LI Guiqian. Experimental study and numerical analysis on seismic performance of reinforced concrete bridge columns[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2010.
- [4] 薛兴伟, 庞兴, 周俊龙. 基于 OpenSEES 的钢筋混凝土柱拟静力分析[J]. 沈阳工业大学报, 2019, 41(2): 211-216.
XUE Xingwei, PANG Xing, ZHOU Junlong. Pseudo-static analysis for reinforced concrete columns based on OpenSEES [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2019, 41(2): 211-216.
- [5] 高秀丽. 钢筋混凝土框架柱抗震性能试验及损伤模型研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.
GAO Xiuli. Experimental investigation and damage model research of RC frame column[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [6] 解咏平, 贾磊. 不同轴压比大尺寸钢筋混凝土柱抗震性能研究[J]. 工业建筑, 2014, 44(7): 31-36.
XIE Yongping, JIA Lei. Seismic behavior of Large-Scale reinforced concrete columns with different axial load ratio [J]. Industrial Construction, 2014, 44(7): 31-36.
- [7] 钱稼茹, 冯宝锐. 不同抗震等级钢筋混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 105-114.
QIAN Jiaru, FENG Baorui. Experimental study on seismic behavior of different seismic grade RC columns [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(7): 105-114.
- [8] SHEIKH S A. Confined concrete columns with Stubs [J]. ACI Structural Journal, 1993, 90(4): 414-431.
- [9] BAE S, BAYRAK O. Plastic hinge length of reinforced concrete columns [J]. ACI Structural Journal, 2008, 105(3): 290-300.
- [10] COLEMAN J, SPACONE E. Localization issues in force-based frame elements [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(11): 1257-1265.
- [11] WAUGH J D. Nonlinear analysis of T-shaped concrete walls subjected to multi-directional displacements[D]. Ames: Iowa State University, 2009.
- [12] 赵金钢, 杜斌, 占玉林, 等. OpenSees 中混凝土本构模型用于模拟结构滞回性能的对比[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(1): 59-67.
ZHAO Jingang, DU Bin, ZHAN Yulin et al. Comparison of constitutive concrete model in OpenSEES hysteresis behavior of structures [J]. Journal of Guilin U-

- niversity of Technology, 2017,37(1): 59-67.
- [13] ZHAO J, SRITHARAN S. Modeling of strain penetration effects in fiber-based analysis of reinforced concrete structures[J]. ACI Structural Journal, 2007, 104(2):133-141.
- [14] LEBORGNE M R. Modeling the post shear failure behavior of reinforced concrete columns[D]. Austin: University of Texas at Austin,2012.
- [15] BERRY M, PARRISH M. Structural performance database user's manual[C]//California,USA: B. P. E. E. Research,Center of University of California,2004.
- [16] 解咏平, 贾磊. 不同轴压比大尺寸钢筋混凝土柱抗震性能研究[J]. 工业建筑,2014,44(7): 31-36.
- XIE Yongping, JIA Lei. Seismic behavior of Large-Scale reinforced concrete columns with different axial load ratio[J]. Industrial Construction, 2014, 44(7): 31-36.
- [17] 陆新征, 叶列平, 潘鹏, 等. 钢筋混凝土框架结构拟静力倒塌试验研究及数值模拟竞赛 II: 关键构件试验[J]. 建筑结构,2012,42(11): 23-26.
- LU Xinzheng, YE Lieping, PAN Peng, et al. Pseudo-static collapse experiments and numerical prediction competition of RC frame structure II: key elements experiments[J]. Building Structure, 2012, 42(11): 23-26.
- [18] 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
- MA Ying. Study on failure modes and seismic behavior of reinforced concrete columns[D]. Dalian: Dalian University of Technology,2012.
- [19] 史庆轩, 杨坤, 潘鹏, 等. 高强箍筋约束高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报,2011,44(12): 9-17.
- SHI Qingxuan, YANG Kun, PAN Peng, et al. Experiments on seismic behavior of high-strength concrete columns confined with high-strength stirrups[J]. China Civil Engineering Journal, 2011,44(12): 9-17.
- [20] 苏俊省, 王俊杰, 王文彪, 等. 配置高强钢筋的混凝土矩形截面柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014,35(11): 20-27.
- SU Junxing, WANG junjie, WANG Wenbiao, et al. Comparative experimental research on seismic performance of rectangular concrete columns reinforced with high strength steel[J]. Journal of Building Structures, 2014,35(11): 20-27.
- [21] 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.
- NIE Jianguo, WANG Yuhang. Comparison study of constitutive model of concrete in ABAQUS for static analysis of structures [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(4): 59-67.
- [22] 李振宝, 解咏平. 单调水平荷载作用下钢筋混凝土柱受弯性能尺寸效应试验研究[J]. 建筑结构学报,2013,34(12): 77-85.
- LI Zhenbao, XIE Yongping. Experimental study on size effect of flexural behavior for reinforced concrete columns subjected to monotonic horizontal loading[J]. Journal of Building Structures, 2013,34(12): 77-85.
- [23] 刘承文. 箍筋约束对钢筋混凝土柱抗震性能影响的试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2010.
- LIU Chengwen. Experimental studies on the effect of hoops on seismic behavior of reinforced concrete columns[D]. Chongqing: Chongqing University,2010.
- [24] 刘飞. 高轴压比密配箍筋 RC 框架柱抗震性能研究[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- LIU Fei. Research on seismic performance of RC frame column with dense stirrups and high axial compression ratio[D]. Changsha: Hunan University,2014.

(编辑 吴海西 沈波)