

文章编号:1673-2049(2018)05-0194-09

用于 ABAQUS 梁单元的混凝土单轴本构模型

王 强,常 凯,侯康康,路 炯,刘 琳

(沈阳建筑大学 土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:为准确模拟钢筋混凝土梁柱构件的滞回性能,对《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)附录 C 混凝土本构模型进行了补充修正。采用原点指向模型与拉区应力-应变曲线随受压残余应变点迁移法,补充完善了混凝土受拉加卸载、拉压受力状态转换的滞回规则;采用基于体积配箍率建立的约束指标 λ_t 分析了钢筋混凝土梁柱构件中箍筋对混凝土的约束作用;对《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)混凝土本构模型中的附加应变算法进行了修正,使得受压混凝土卸载/再加载变形模量能够反映循环加载下混凝土的受压损伤不可恢复特性。利用 ABAQUS 用户子程序接口 UMAT, VUMAT 进行二次开发,编写了适用于显、隐式动力分析的梁单元混凝土本构模型子程序,并对往复荷载下钢筋混凝土柱受力性能进行了模拟分析。结果表明:模型的数值模拟结果与拟静力试验结果吻合良好;构建的混凝土本构模型能够用于混凝土梁柱构件在复杂受力状态下的非线性性能分析。

关键词:混凝土本构模型;设计规范;梁柱构件;滞回性能;用户材料子程序

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

Uniaxial Concrete Constitutive Model for ABAQUS Beam Element

WANG Qiang, CHANG Kai, HOU Kang-kang, LU Jiong, LIU Lin

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: In order to accurately simulate the hysteresis behavior of reinforced concrete (RC) column-beam member, the concrete constitutive relations in *Code for design of concrete structures* (GB 50010—2010) was supplemented and amended. By using the origin-oriented-model and tensile stress-strain curve shifted with the residual strain of compression, the hysteretic rules for tension loading and unloading as well as reversal between tension and compression were supplemented. The confinement parameter λ_t based on volume stirrup ratio, the confinement effects of the stirrup were considered in the compression envelop. The arithmetic of additional strain in the concrete constitutive relation in *Code for design of concrete structures* (GB 50010—2010) was also modified, so that the loading and unloading modulus of compression could reflect the unrecoverable characteristic of compression damage of concrete with cyclic loading. The UMAT and VUMAT concrete user subroutines in software ABAQUS were developed respectively, and attached to the implicit and explicit dynamic analyses of concrete constitutive model of beam element. The hysteretic performance of RC columns under cyclic loading was numerically simulated. The results show that the numerical simulation results of the model are in good agreement with the experimental results of the pseudo-static tests. The established model

收稿日期:2018-07-02

基金项目:国家自然科学基金项目(51178279);沈阳市科技计划项目(F16-175-9-00)

作者简介:王 强(1971-),男,内蒙古巴盟人,教授,工学博士,E-mail:wangqiangsy@163.com。

can meet the demand for analyzing the nonlinear performance of RC column-beam element under the multi-axial loading conditions.

Key words: concrete constitutive model; design code; beam-column member; hysteresis behavior; user material subroutine

0 引 言

在强震作用下,复杂高层建筑结构会进入塑性状态,因此进行结构的动力弹塑性时程分析对于评估结构的抗震安全性具有重要意义。整体结构分析时,采用梁单元能够以较少的计算量合理描述梁柱构件的力学性态。梁单元模型通常有塑性铰和纤维模型 2 类,纤维梁单元模型直接从材料单轴应力-应变本构关系和截面构造配筋出发,相对于塑性铰模型,其能够更准确地描述梁柱构件的轴力-双向弯曲耦合效应,在工程界已得到了广泛认可^[1-2]。

通用有限元软件 ABAQUS 拥有强大的非线性分析能力,在分析大型复杂结构时得到了广泛应用。然而目前该软件缺乏用于三维纤维梁单元的混凝土本构模型,无法采用梁单元描述钢筋混凝土梁柱杆件的非线性力学行为,因此采用该软件进行建筑结构的动力弹塑性时程分析存在困难。为此,已有学者通过 ABAQUS 的用户子程序接口,基于 Scott-Kent-Park 的混凝土本构模型对用于三维梁单元的混凝土单轴本构模型进行二次开发^[3-4]。

2008 年汶川地震后,中国修订了《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010,以下简称《规范》),给出了考虑损伤的混凝土本构关系。采用该本构关系进行结构的弹塑性分析对于中国工程界具有重要的现实意义。目前,已有部分学者基于该本构模型进行了二次开发,如胡晓斌等^[5]、齐虎等^[6],但前者并未给出受拉段的滞回规则且模拟结果与试验结果差距较大,而后者缺少实例数据对比。因此,本文对《规范》附录 C 混凝土本构关系进行了深入研究,首先补充了受拉加卸载滞回规则与考虑箍筋对混凝土的约束作用,并修正了受压损伤恢复的问题,随后利用 ABAQUS 用户子程序接口 UMAT,VUMAT 进行二次开发,编写了用于显、隐式分析的梁单元混凝土单轴本构模型子程序,用于钢筋混凝土梁柱构件在多维受力状态下的弹塑性分析,满足结构动力弹塑性分析的需求。

1 纤维梁单元

基于材料单轴本构关系的纤维模型是将梁柱构

件沿纵向划分为若干子段,再沿构件横截面划分成纤维束。ABAQUS 中的 B31 纤维梁单元构型如图 1 所示。每个纤维(以截面积分点表征)只考虑它的轴向本构关系,且可定义不同的本构关系。构件横截面变形符合平截面假定。对截面纤维的当前状态积分就可以得到截面的双向抗弯刚度、双向抵抗矩以及轴力,进而沿构件长进行积分,可以得到精确的构件单元刚度矩阵。纤维模型可以自然、简单地描述构件的双向弯曲-轴力耦合效应^[7-8]。

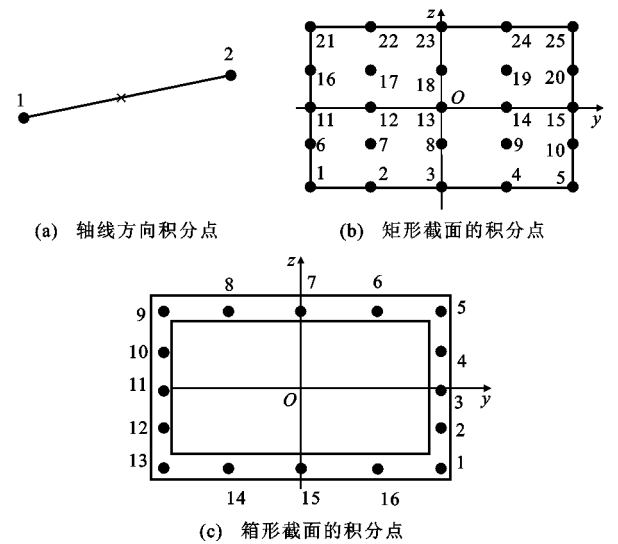


图 1 B31 纤维梁单元的构型

Fig. 1 Configuration of B31 Fiber Beam Element

2 材料的本构模型

纤维模型的准确度在很大程度上依赖其使用的材料本构模型与材料参数的合理性。为准确描述梁柱构件中钢筋与混凝土的材料性能,本文采用 2 个共节点的梁单元来分别模拟构件中的纵向钢筋与混凝土材料,且纵向钢筋通过等面积、等位置原则代换成箱形截面单元,从而分别定义混凝土和钢筋的本构模型与材料参数。

2.1 钢筋的本构模型

大部分学者在模拟钢筋混凝土构件受力性能时,钢筋本构通常采用 ABAQUS 自带本构,但该本构对于包兴格效应考虑不足。因此,本文钢筋本构采用自编单轴本构,可较为充分地考虑钢材的包兴格效应以及屈服、硬化与软化特性,其中本构的骨架

曲线采用 Esmacily-Xiao 模型^[9],加卸载曲线采用 Légeron 模型^[10],具体图形如图 2 所示。图 2 中, σ 为应力, ϵ 为应变。该本构模型的准确性验证和模型的参数取值方法可参考文献[11]。

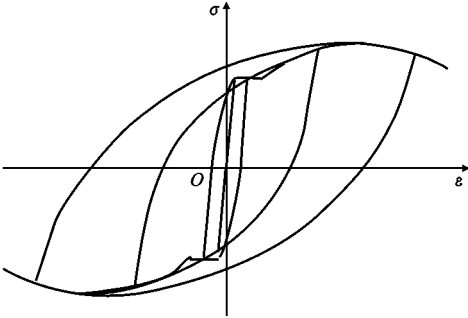


图 2 钢筋应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain Curve of Steel

2.2 混凝土的本构模型

2.2.1 受压区骨架曲线与滞回规则

《规范》给出了素混凝土的受压区骨架曲线及滞回规则,如图 3 所示,其中, $f_{c,r}$ 为混凝土抗压强度代表值, $\epsilon_{c,r}$ 为混凝土受压峰值应力对应的应变, $\sigma_{un}, \epsilon_{un}$ 分别为受压混凝土骨架曲线开始卸载时的应力和应变, E_r 为受压混凝土卸载/再加载的变形模量, ϵ_z 为受压混凝土卸载至零应力点时的残余应变。骨架曲线具体公式参见文献[12]。

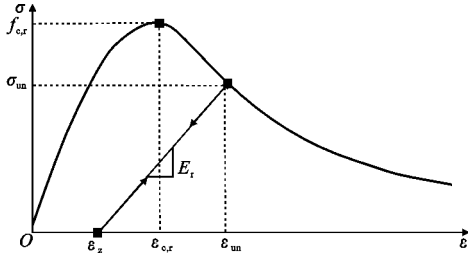


图 3 混凝土受压区骨架曲线及滞回规则

Fig. 3 Skeleton Curve and Hysteretic Rule in Concrete Compression Area

(1)受压区骨架曲线上的应力-应变关系

受压区骨架曲线上的应力-应变关系采用混凝土单轴受压损伤演化参数 d_c 表征,即

$$\sigma = (1 - d_c) E_0 \epsilon \tag{1}$$

$$d_c = \begin{cases} 1 - \frac{\rho_c n}{n - 1 + x^n} & x \leq 1 \\ 1 - \frac{\rho_c}{\alpha_c (x - 1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \tag{2}$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{c,r}} \tag{3}$$

$$\rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_0 \epsilon_{c,r}} \tag{4}$$

$$n = \frac{E_0 \epsilon_{c,r}}{E_0 \epsilon_{c,r} - f_{c,r}} \tag{5}$$

式中: E_0 为素混凝土的弹性模量; α_c 为单轴受压应力-应变曲线下降段参数。

文献[13]指出,钢筋混凝土梁柱构件中由于箍筋对核心区混凝土的约束作用,使得混凝土的受压应力-应变曲线随着约束效应的增大由明显的陡峰向平缓饱满的曲线过渡。因此在构件滞回性能模拟时有必要考虑箍筋的约束作用。本文参照文献[11],采用约束指标 λ_t 来考虑钢筋混凝土梁柱构件中箍筋对混凝土的约束作用,对《规范》中的混凝土应力-应变曲线方程进行修正。 λ_t 计算公式如下

$$\lambda_t = \rho_v \frac{f_{yv}}{f_{c,r}} \tag{6}$$

式中: f_{yv} 为箍筋屈服强度; ρ_v 为混凝土梁柱构件中箍筋的体积配箍率。

此时,约束混凝土的抗压强度 f_{cc} 、峰值应变 ϵ_{pc} 及曲线下降段参数 α_{dc} 为

$$f_{cc} = (1 + 0.5 \lambda_t) f_{c,r} \tag{7}$$

$$\epsilon_{pc} = (1 + 2.5 \lambda_t) \epsilon_{c,r} \tag{8}$$

$$\alpha_{dc} = (1 - 1.75 \lambda_t) \alpha_c \tag{9}$$

将 $f_{cc}, \epsilon_{pc}, \alpha_{dc}$ 代替式(2)~(5)中相应的 $f_{c,r}, \epsilon_{c,r}, \alpha_c$,则可得梁柱构件中考虑箍筋约束作用的混凝土应力-应变骨架曲线。

考虑箍筋约束作用的混凝土与非约束混凝土的应力-应变曲线对比如图 4 所示。由图 4 可以看出,当柱构件中混凝土考虑箍筋约束作用时,混凝土抗压强度、峰值应变等都有所提高,尤其是曲线下降段形状趋于平缓。

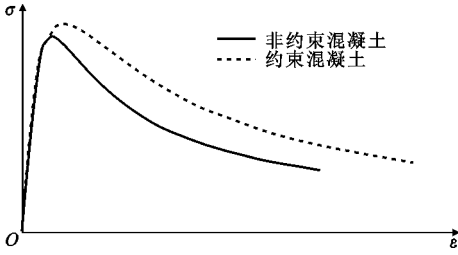


图 4 修正的受压骨架曲线

Fig. 4 Revised Compression Skeleton Curves

(2)受压区滞回规则的修正

《规范》已给出了重复荷载作用下受压混凝土卸载与再加载路径方程,即

$$\sigma = E_r (\epsilon - \epsilon_z) \tag{10}$$

$$E_r = \frac{\sigma_{un}}{\sigma_{un} - \epsilon_z} \tag{11}$$

$$\epsilon_z = \sigma_{un} - \frac{(\epsilon_{un} + \epsilon_{ca}) \sigma_{un}}{\sigma_{un} + E_c \epsilon_{ca}} \tag{12}$$

$$\epsilon_{ca} = \max\left\{\frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_{un}}, \frac{0.09\epsilon_{un}}{\epsilon_c}\right\} \sqrt{\epsilon_c \epsilon_{un}} \quad (13)$$

式中: ϵ_{ca} 为附加应变。

已有研究表明,对于混凝土材料,重复加卸载条件下的材料损伤是不可恢复的,即受压混凝土卸载/再加载的变形模量单调降低^[13-14]。当卸载应变较大时,采用式(11)~(13)确定的受压混凝土卸载/再加载的变形模量 E_r ,会出现随卸载应变增大而增大的现象,即混凝土受压损伤恢复。

由图 5 可以看出,采用《规范》公式,在卸载应变超过 A 点时出现了变形模量 E_r 增大的情况。A 点应变为 $2.87\epsilon_c$,即为 $\epsilon_c/(\epsilon_c + \epsilon_{un}) = 0.09\epsilon_{un}/\epsilon_c$ 时对应的卸载应变 ϵ_{un} 。因此,本文对式(13)进行了修正,采用式(14)计算附加应变 ϵ_{ca} ,即

$$\epsilon_{ca} = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c + \epsilon_{un}} \sqrt{\epsilon_c \epsilon_{un}} \quad (14)$$

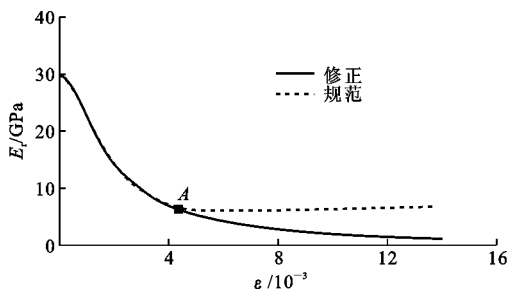


图 5 受压混凝土卸载/再加载的变形模量 E_r

Fig. 5 Deformation Modulus E_r of Unloaded/Reloading of Compressed Concrete

计算结果表明,按公式(14)确定的附加应变得到的变形模量 E_r 单调下降,能够合理表征循环加载下混凝土材料的受压损伤不可恢复特性。

2.2.2 受拉区骨架曲线与滞回规则

《规范》中给出了受拉区骨架曲线,如图 6 所示,其中, $f_{t,r}$, $\epsilon_{t,r}$ 分别为受拉区应力、应变,具体公式参见文献[12],但是《规范》中并没有给出明确的受拉区滞回规则。目前王瑾等^[15-16]在 OpenSEES 中采用 Concrete02 模型在模拟混凝土构件滞回性能的分析中取得了较好的结果。本文参照 OpenSEES 中 Concrete02 模型,采用原点指向规则,对《规范》混凝土本构补充混凝土受拉区滞回规则。

混凝土在拉-压与压-拉往复加载条件下,本文采用拉区应力-应变曲线随受压残余应变点迁移的滞回规则。若混凝土初始受力即为受拉,则沿受拉区骨架曲线加载。若受拉卸载,卸载曲线由受拉卸载点 B 指向初始受拉点 A,如图 7 所示。随后受压加载,则沿受压区骨架曲线加载,加载至 C 点时卸

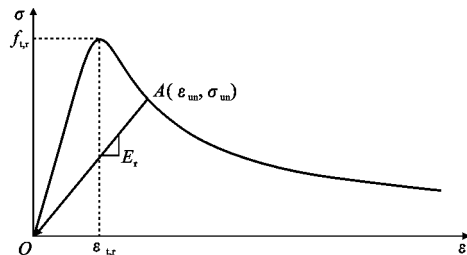


图 6 混凝土受拉区骨架曲线及滞回规则

Fig. 6 Skeleton Curve and Hysteretic Rule in Concrete Tensile Area

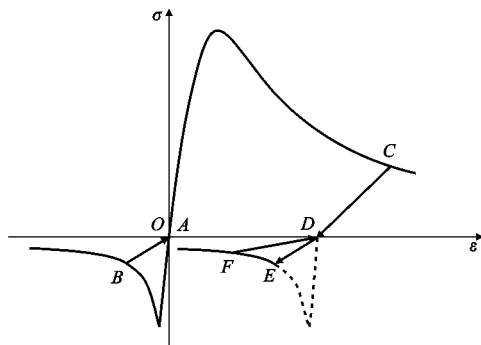


图 7 混凝土拉压转换时的滞回规则

Fig. 7 Hysteretic Rule of Translation Between Compression and Tension of Concrete

载至受压残余应变点 D 点。继续受拉加载时其路径为 DE (DE // BA), 至 F 点进入受拉卸载段时, 依据原点指向规则, 其路线为指向受压残余应变点 D 的 FD 直线。受压再加载按 DC 路线回到受压曲线上的 C 点。

3 用户自定义材料子程序的实现

ABAQUS 软件提供了基于隐式算法的 UMAT 材料子程序接口和基于显式算法的 VUMAT 材料子程序接口, 分别应用于隐式求解器 (Standard) 和显式求解器 (Explicit)^[17]。

采用前述的混凝土与钢筋本构关系, 笔者基于 UMAT 接口进行二次开发, 编制了材料子程序, 并嵌入 ABAQUS/Standard 模块中。由于隐式求解必须引入雅可比矩阵, 而雅可比矩阵和 $N+1$ 时刻的应力、应变以及状态变量是实时更新的, 这导致材料非线性发展较为强烈时会出现雅可比矩阵奇异而产生隐式求解的数值不收敛问题。因此, 本文又基于 VUMAT 接口, 编制了用于显式分析的材料子程序。在进行梁柱构件乃至整体结构的非线性分析时, 对于竖向加载工况下结构非线性发展较弱的工况, 采用隐式求解方法; 对于水平加载等结构非线性发展比较强烈的工况则采用显式分析方法。通过

显、隐式结合来完成结构在不同荷载工况下的接力计算。

4 算例验证

为验证本文所采用混凝土本构的合理性,分别对文献[18]中钢筋混凝土柱试件边柱 A 及文献[19]中钢筋混凝土柱试件 TP74,TP77 进行数值模拟。

4.1 试件边柱 A

本文首先模拟了文献[18]中轴压-单轴受弯钢筋混凝土柱试件边柱 A 在低周往复荷载下的滞回性能。

4.1.1 试验概况

试件构造和配筋如图 8 所示,加载图示见图 9,加载规则如图 10 所示,材料参数取值见表 1。

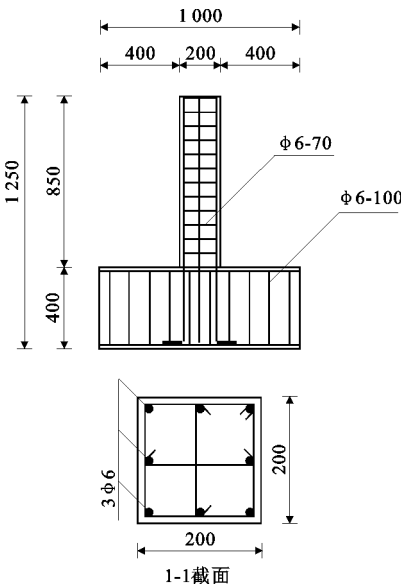


图 8 钢筋混凝土柱试件(单位:mm)

Fig. 8 Reinforcement Concrete Column Specimens (Unit:mm)

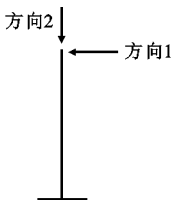


图 9 边柱 A 加载图示

Fig. 9 Loading Diagram of Side Column A

4.1.2 结果分析

试验与模拟结果对比如图 11 所示。可以看出,当不考虑钢筋混凝土柱中箍筋对混凝土的约束作用时,本文采用的混凝土本构模型已能够较好地模拟混凝土柱的滞回性能,滞回曲线饱满程度与试验结

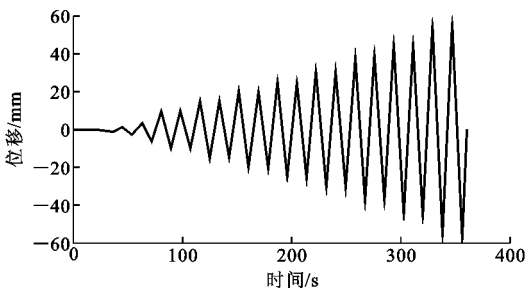


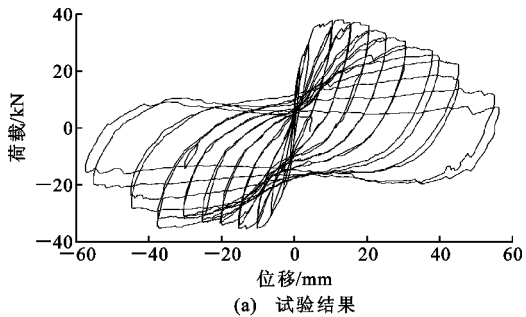
图 10 边柱 A 水平位移加载规则

Fig. 10 Horizontal Displacement Loading Rule of Side Column A

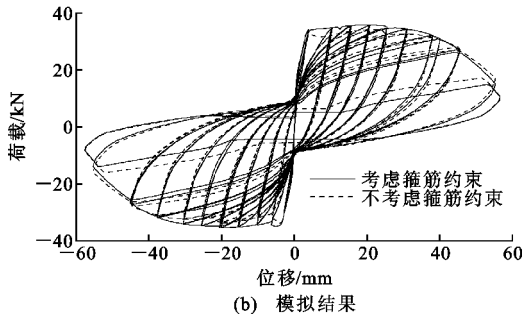
表 1 材料参数

Tab. 1 Material Parameters

| 试件编号 | 混凝土强度/ MPa | 纵筋强度/ MPa | 箍筋强度/ MPa | 轴力/kN |
|------|---------------|--------------|--------------|-------|
| 边柱 A | 30.1 | 582 | 441 | 141 |



(a) 试验结果



(b) 模拟结果

图 11 边柱 A 试验结果与模拟结果对比

Fig. 11 Comparison of Experimental Results and Simulating Results of Side Column A

果接近,但承载力略低。当考虑混凝土柱中箍筋对混凝土的约束作用时,计算所得承载能力有所提高,模拟结果与试验结果更为吻合,表明本文所采用的混凝土本构模型较为合理。

图 12 为在考虑箍筋约束情况下修正附加应变前后计算得出的滞回曲线对比。可以看出,2 条曲线基本重合,证明本文对公式(13)的修正是可行的。

图 13 为试件边柱 A 在加载幅值 10,25,45 mm 时的单圈滞回曲线对比。由图 13 可知:加载幅值为 10 mm 时,滞回环峰值点与实测曲线峰值点较为接

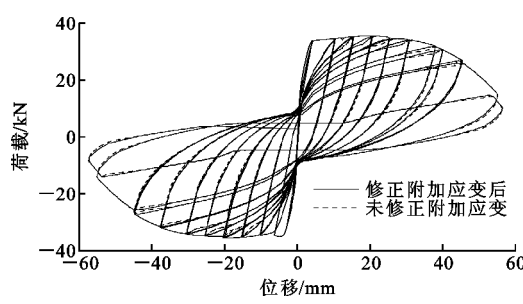


图 12 边柱 A 修正附加应变前后对比
Fig. 12 Comparison of Side Column A Before and After Modification of Additional Strain

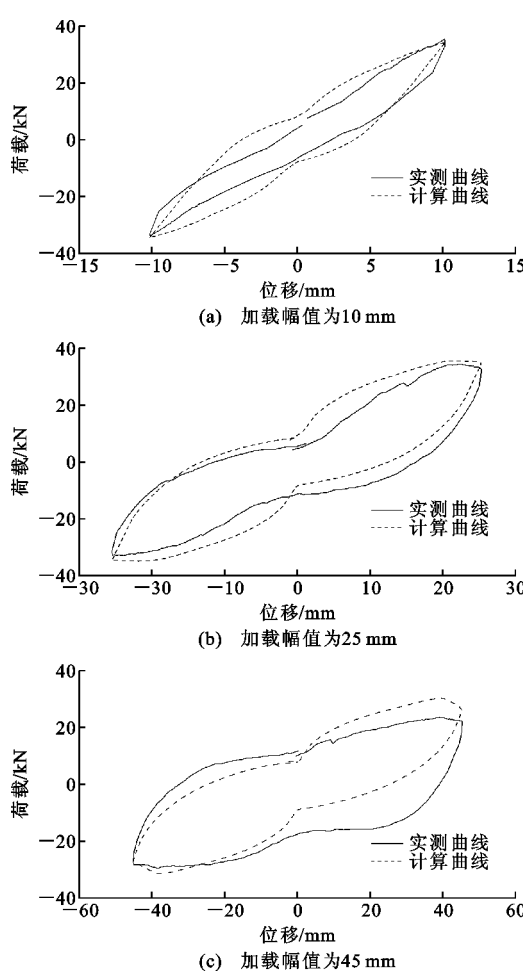


图 13 边柱 A 单圈滞回曲线对比
Fig. 13 Comparion of Single Loop Hysteresis Curves of Side Column A

近,相对误差达到 2%,但计算曲线的单圈耗能能力(单圈滞回环包含的面积)略高于实测曲线的耗能能力;加载幅值达到 25 mm 时,计算曲线的滞回环峰值点略高于实测曲线,计算曲线的耗能能力略高于实测曲线的耗能能力,相对误差低于 16%。当加载幅值达到 45 mm 时,滞回环峰值点较实测曲线峰值点高约 20%,且计算曲线较“瘦”,其单圈耗能能力

略低于实测曲线,相对误差约为 4%。这可能与模拟分析未考虑试件的剪切非线性、轴压力波动、黏结滑移等因素有关。此外,计算曲线能够反映实测曲线的捏缩现象。

图 14 为计算所得试件边柱 A 底部钢筋、混凝土单元截面中的角部纤维应力-应变曲线。由图 14 可知,在单轴往复加载过程中,混凝土纤维受压已进入骨架曲线下降段,钢筋纤维受拉已进入骨架曲线软化段,且应力-应变曲线符合本文所构建的混凝土本构模型的滞回规则。

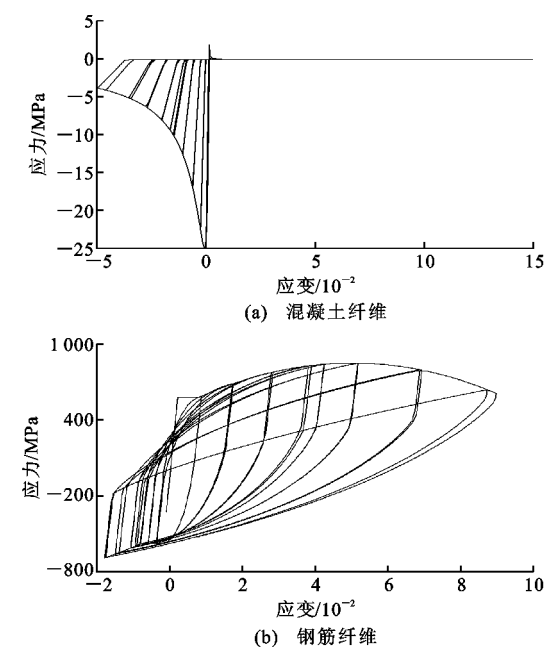


图 14 边柱 A 中纤维的应力-应变曲线
Fig. 14 Stress-strain Curves of Fiber in Side Column A

4.2 试件 TP74, TP77

本文对文献[19]中的试件 TP74 和 TP77 进行模拟分析。构件单元及截面划分与试件边柱 A 相同。试件及试验概况详见文献[19]。

4.2.1 单轴加载试件 TP74

图 15 为 TP74 实测滞回曲线和采用本文构建的材料本构计算所得的滞回曲线对比,考虑箍筋约束和不考虑箍筋约束 2 种情况。可以看出,计算所得滞回曲线饱满程度均与试验结果较为接近,且考虑箍筋约束后计算所得承载力有所提高,与实测曲线更为吻合,证明了本文所构建的混凝土本构模型的合理性。

图 16 为在考虑箍筋约束情况下计算得出的附加应变修正前后滞回曲线对比。通过对比发现,修正附加应变前后最大承载力一致,但修正后的承载力并无明显退化现象,且滞回曲线与图 15(a)的实

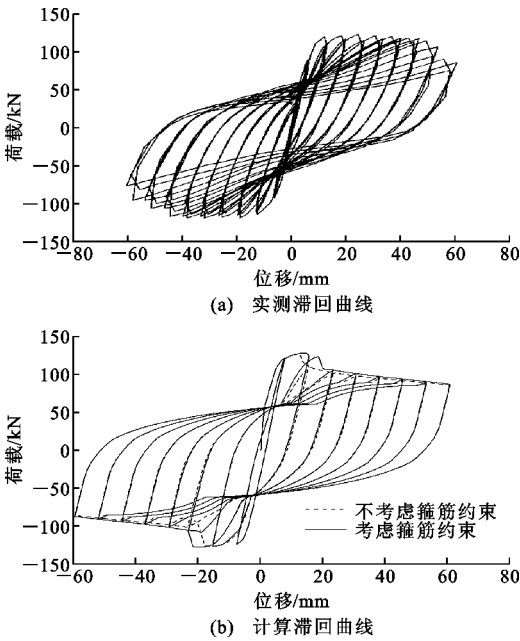


图 15 试件 TP74 试验结果与模拟结果对比
Fig. 15 Comparison of Experimental Results and Simulating Results of Specimen TP74

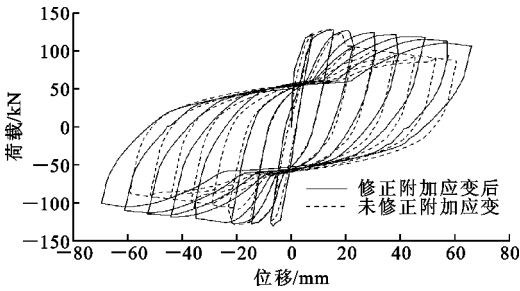


图 16 试件 TP74 修正附加应变前后对比
Fig. 16 Comparison of Additional Strain of Specimen TP74 Before and After Modification

测滞回曲线更为吻合,这表明了本文修正附加应变的正确性。

4.2.2 双轴加载试件 TP77

图 17 为试验与数值模拟所得滞回曲线,由图 17 可知,计算所得的承载力、强度退化程度、滞回曲线饱满程度均与试验结果较为接近。

此外,在试验曲线与计算曲线中,在保持方向 1 位移恒定时,在方向 2 加载均会使方向 1 的承载力出现明显的下降趋势,反之亦然。此现象表明,本文提出的模型能够合理地反映梁柱构件的双向弯曲耦合性能。

5 结 语

(1) 本文采用原点指向模型与拉区应力-应变曲线随受压残余应变点迁移法,补充完善了《规范》混

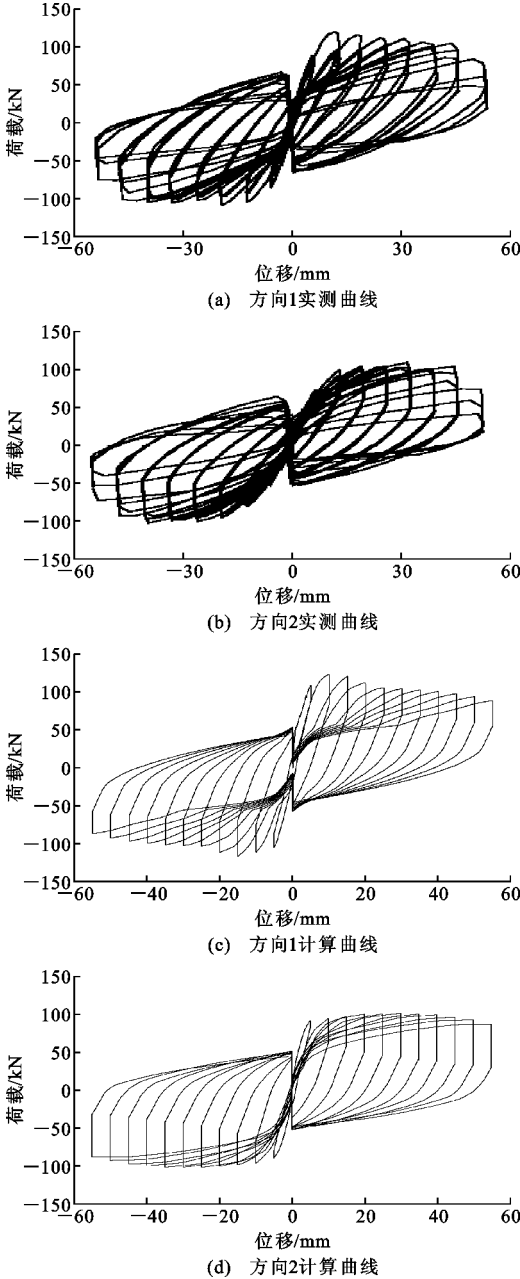


图 17 试件 TP77 试验结果与模拟结果对比
Fig. 17 Comparison of Experimental Results and Simulating Results of Specimen TP77

凝土本构模型的混凝土受拉段加卸载、拉压受力状态转换的滞回规则。

(2) 本文采用基于体积配箍率建立的约束指标 λ_t 考虑钢筋混凝土梁柱构件中箍筋对混凝土的约束作用,对《规范》混凝土受压应力-应变骨架曲线方程进行修正,有效提高了钢筋混凝土梁柱构件滞回性能模拟结果的准确性。

(3) 本文对《规范》混凝土本构模型中的附加应变算法进行了修正,所得的受压混凝土卸载/再加载变形模量 E_r 能够合理地考虑循环加载下混凝土受

压损伤不可恢复特性。

(4)本文构建的混凝土本构模型及相应的用户材料子程序能够细致地描述梁柱构件受力过程中截面的内力变化情况,准确地模拟钢筋混凝土柱在低周往复荷载作用下的滞回性能,能进一步用于大型复杂结构的弹塑性反应分析。

参考文献:

References:

- [1] 李云贵,邵 弘,田志昌,等. 多层、高层建筑结构弹塑性动力、静力分析[J]. 建筑结构学报,2002,23(5):56-62.
- LI Yun-gui, SHAO Hong, TIAN Zhi-chang, et al. Elastic-plastic Dynamic and Static Analysis of Building Structures[J]. Journal of Building Structures, 2002,23(5):56-62.
- [2] 齐 虎,孙景江,林 淋. OPENSEES 中纤维模型的研究[J]. 世界地震工程,2007,23(4):48-54.
- QI Hu, SUN Jing-jiang, LIN Lin. Research on Fiber Model of OPENSEES[J]. World Earthquake Engineering,2007,23(4):48-54.
- [3] 李承铭,李志山,王国俭. 混凝土梁柱构件基于截面纤维模型的弹塑性分析[J]. 建筑结构,2007,37(12):33-35,92.
- LI Cheng-ming, LI Zhi-shan, WANG Guo-jian. Study on Elastic-plastic Finite Element Analysis Based on Section Fiber Beam-column Elements [J]. Building Structure,2007,37(12):33-35,92.
- [4] 王 强,潘天林,刘 明,等. 用于 ABAQUS 显式分析梁单元的混凝土单轴本构模型[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2011,27(4):679-684.
- WANG Qiang, PAN Tian-lin, LIU Ming, et al. Study on a Uniaxial Constitutive Model of Concrete for Explicit Dynamic Beam Elements of ABAQUS[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2011,27(4):679-684.
- [5] 胡晓斌,向 浩,李文霞. 考虑损伤的混凝土用户材料子程序二次开发及验证[J]. 建筑结构,2013,43(增2):555-558.
- HU Xiao-bin, XIANG Hao, LI Wen-xia. Secondary Development and Verification of User Subroutines of Concrete Material Considering Damage[J]. Building Structure,2013,43(S2):555-558.
- [6] 齐 虎,李云贵,陈晓明,等. 混凝土单轴本构模型研究及 ABAQUS 二次开发[J]. 建筑结构,2014,44(11):94-96.
- QI Hu, LI Yun-gui, CHEN Xiao-ming, et al. Study on Uniaxial Constitutive Model of Concrete in Code for Design of Concrete Structures and Development in ABAQUS[J]. Building Structure, 2014, 44(11): 94-96.
- [7] 雷 拓,刘伯权,刘 锋. 基于 ABAQUS 隐式分析的梁单元材料模型开发应用[J]. 中南大学学报:自然科学版,2013,44(8):3503-3511.
- LEI Tuo, LIU Bo-quan, LIU Feng. Development and Application of Material Constitutive Models Based on ABAQUS/Standard Beam Elements [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013,44(8):3503-3511.
- [8] 秦从律,张爱晖. 基于截面纤维模型的弹塑性时程分析方法[J]. 浙江大学学报:工学版,2005,39(7):1003-1008.
- QIN Cong-lu, ZHANG Ai-hui. Nonlinear Time History Analysis Based on Section Fiber Model[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39(7):1003-1008.
- [9] LEGERON F, PAULTRE P, MAZAR S J. Damage Mechanics Modeling of Nonlinear Seismic Behavior of Concrete Structures[J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(6):946-955.
- [10] DODD L, RESTREOP-POSADA J. Model for Predicting Cyclic Behavior of Reinforcing Steel[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3):433-445.
- [11] 王 强,朱丽丽,李 哲,等. 用于 ABAQUS 显式分析梁单元的钢筋本构模型研究[J]. 土木工程学报,2013,46(增2):100-105.
- WANG Qiang, ZHU Li-li, LI Zhe, et al. Study on the Constitutive Model of Steel for Explicit Dynamic Beam Elements of ABAQUS[J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(S2):100-105.
- [12] GB 50010—2010, 混凝土结构设计规范[S].
- GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [13] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 3 版. 北京:清华大学出版社.
- GUO Zhen-hai. Principles of Reinforced Concrete [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [14] SINHA B P, GERSTLE K H, TULIN L G. Stress-strain Relations for Concrete Under Cyclic Loading [J]. ACI Journal, 1964, 61(2):195-211.
- [15] 王 瑾,蔡新江,田石柱. 基于 OpenSees 的 CFRP 加固 RC 短柱抗震性能数值模拟[J]. 世界地震工程,2009,25(4):108-111.
- WANG Jin, CAI Xin-jiang, TIAN Shi-zhu. Numerical Simulation on Seismic Behavior of CFRP Retrofitted

RC Short Column Based on OpenSees [J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(4): 108-111.

[16] 童师敏, 陈 麟, 周 云. 双钢板高强混凝土组合剪力墙滞回性能模拟[J]. 华南地震, 2014, 34(增): 102-106.

TONG Shi-min, CHEN Lin, ZHOU Yun. Hysteretic Behavior Simulation of Double Skin Composite Shear Wall Filled with High Strength Concrete Based on OpenSees Software[J]. South China Journal of Seismology, 2014, 34(S): 102-106.

[17] 庄 茁, 由小川, 廖剑晖, 等. 基于 ABAQUS 的有限元分析和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.

ZHUANG Zhuo, YOU Xiao-chuan, LIAO Jian-hui, et al. FEM Analysis and Application Based on ABAQUS[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

[18] 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 Xin-zheng, YE Lie-ping, PAN Peng, et al. Pseudo-static Collapse Experiments and Numerical Prediction Competition of RC Frame Structure II: Key Elements Experiment [J]. Building Structure, 2012, 42(11): 23-26.

[19] KAWASHIMA K, WATANABE G, HAYAKAWA R. Seismic Performance of RC Bridge Columns Subjected to Bilateral Excitation[C]//OHAHARA. Proceedings of the 35th Joint Meeting of U. S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects. Tsukuba: Public Works Research Institute, 2003: 1-16.