

用于剪力墙滞回性能分析的材料本构模型研究

王 强¹, 路 炯¹, 侯康康¹, 尹镇平²

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 辽宁省人防建筑设计研究院, 辽宁 沈阳 110001)

摘 要 目的 提出适用于 ABAQUS 的混凝土本构计算方法, 解决现有材料本构模型不能准确模拟地震作用下钢筋混凝土剪力墙的滞回性能的问题. 方法 基于《混凝土结构设计规范》附录 C 混凝土应力-应变曲线, 提出适用于 ABAQUS 的混凝土本构模型; 采用钢筋单轴本构模型合理考虑了 Bauschinger 效应, 利用 ABAQUS 用户子程序接口 VUMAT 进行二次开发, 编制了用于显式动力分析的钢筋本构模型的计算程序, 并采用分层壳单元对往复荷载下钢筋混凝土剪力墙滞回性能进行数值模拟. 结果 通过实验对比, 验证了采用笔者采用的混凝土和钢筋本构模型能够较好地反映钢筋混凝土剪力墙在低周往复荷载作用下的滞回性能. 结论 数值模拟结果与试验结果吻合良好, 笔者采用的材料本构模型能够较好地模拟钢筋混凝土剪力墙的滞回性能.

关键词 剪力墙; 混凝土本构模型; 钢筋本构模型; 分层壳单元

中图分类号 TU375.3

文献标志码 A

Study of Material Constitutive Model for Shear Wall Hysteretic Behavior Analysis

WANG Qiang¹, LU Jiong¹, HOU Kangkang¹, YIN Zhengping²

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Architecture Design & Research Institute of Civil Air Defence in Liaoning Province, Shenyang, China, 110001)

Abstract: The purpose is to solve the problem that the existing material constitutive model can not accurately simulate the hysteresis performance of RC shear wall under earthquake action. In this paper, a constitutive method of concrete for ABAQUS is proposed based on stress-strain curve in appendix C of *Code for Concrete Structures Design* and the uniaxial steel is established in order to precisely simulate the hysteretic performance of reinforced concrete shear wall under seismic loads. Bauschinger effect is also considered in the uniaxial constitutive model of steel. The material subroutines of these models are simultaneously developed and applied to the explicit dynamic module of ABAQUS by means of user-defined subroutine interface (VUMAT). In addition, a layered shell element is used to simulate the hysteretic behavior of reinforced concrete shear walls under cyclic loading. Compared with the experimental results, it is proved that the constitutive model of concrete and steel presented in this paper can reflect the hysteretic behavior of reinforced concrete

收稿日期: 2017-03-17

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, 教授, 博士, 主要从事结构抗震理论及工程应用等方面研究.

shear wall under low cyclic loading. The numerical simulation results are in good agreement with the experimental results. The material constitutive model adopted in this paper can simulate the hysteretic behavior of reinforced concrete shear wall.

Key words: shear wall; concrete constitutive model; steel constitutive model; layered shell element

钢筋混凝土剪力墙及其组成结构具有刚度大、承载力高等优点,目前在高层、超高层中已被广泛应用.为研究钢筋混凝土剪力墙的力学性能,很多研究人员建立了力学计算模型对剪力墙进行非线性分析.其力学模型对结构非线性动力时程分析的计算精度和计算效率有很大影响^[1-2].因此,剪力墙的非线性分析模型的研究就显得非常重要.因为有限元软件 ABAQUS 拥有强大的非线性分析能力,所以研究者均采用 ABAQUS 来分析高层建筑结构在大震作用下的动力弹塑性响应,以评估结构的抗倒塌性能^[3-6].

目前,已有很多学者对钢筋混凝土梁柱构件进行了滞回性能分析,并取得了大量研究成果.对于剪力墙滞回性能分析,取得的结果不是很理想.如张劲等^[7]混凝土采用 CDP 模型,钢筋采用 ABAQUS 自带双折线随动强化模型较好地模拟剪力墙的骨架曲线,但无法反映剪力墙的捏拢特性;范浩等^[8]混凝土采用 McKenna 模型,钢筋采用自编本构较好地模拟出了剪力墙的捏拢特性,然而其模拟数值却与实验值偏差较大.基于此,笔者通过对《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)中混凝土和钢筋本构模型的研究,分析剪力墙滞回性能,并通过试验来验证模型的正确性,结果表明笔者采用的材料本构模型能够较好地模拟钢筋混凝土剪力墙的滞回性能.

1 材料的本构模型

1.1 混凝土的本构模型

ABAQUS 为用户提供了 3 种混凝土材料本构模型:弥散裂缝模型、塑性损伤 (CDP) 模型和脆性开裂模型.其中,CDP 模

型可以用于单向加载、循环加载及动态加载等多种力学行为.它使用非关压缩塑性和各向同性损伤弹性相结合的方式描述混凝土破碎过程中发生的不可恢复的损伤^[9],这一特性使得 CDP 模型具有更好的收敛性.

CDP 模型定义一个相对完整的混凝土材料本构的格式[10].在弹性阶段,CDP 模型中弹性模量保持不变,进入损伤阶段后,CDP 模型的弹性模量为

$$E = (1 - d) E_0.$$
 (1)

式中: d 为拉伸或压缩时的塑性损伤因子,取 0~1,如果 $d=0$,表示材料未出现损伤,如果 $d=1$,表示材料强度的完全丧失; E_0 为初始弹性模量.

1.1.1 CDP 模型应力-应变关系

笔者结合混凝土结构设计规范给出了适合 ABAQUS 软件的应力-应变曲线关系.其中混凝土单轴受压曲线采用规范曲线;混凝土单轴受拉曲线做了相应简化,在计算中前半部分取为线弹性,损伤只发生在峰值后(见图 1).

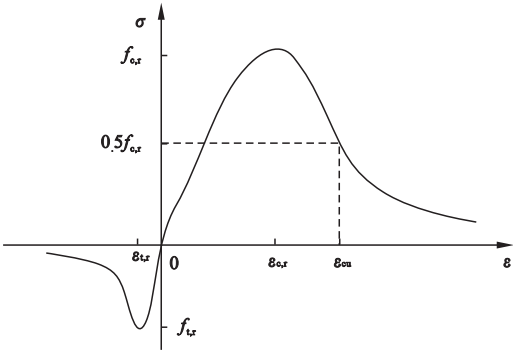


图1 混凝土应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of concrete

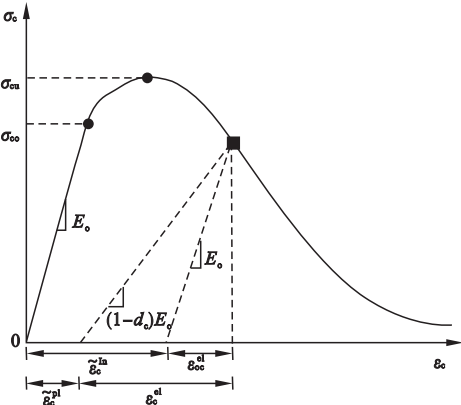
图中: $f_{c,r}$ 为混凝土单轴受压强度标准值; $\epsilon_{c,r}$ 为与单轴受压强度标准值相对应的混凝土峰值压应变; $f_{t,r}$ 为混凝土单轴抗拉强度

标准值; $\varepsilon_{t,r}$ 为与单轴抗拉强度标准值相对应的混凝土峰值拉应变。

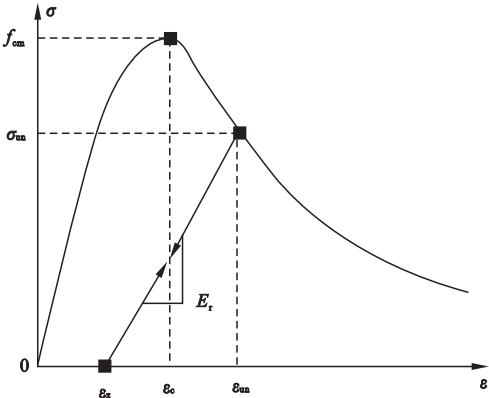
1.1.2 损伤因子的确定

在《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)中,定义混凝土单轴受压/受拉损伤演化参数用来描述受压/受拉混凝土卸载回原点,混凝土模量的降低情况。ABAQUS 和《混

凝土结构设计规范》中混凝土受压应力-应变如图 2 所示。从图 2(b)中,可以看出 ABAQUS 中定义的混凝土损伤并不是规范提出的损伤演化参数。目前比较通用的混凝土塑性损伤计算方法是根据 Sidoroff 的能量等价原理求取^[11]。



(a)《混凝土结构设计规范》中模型



(b)ABAQUS中混凝土损伤塑性模型

图 2 混凝土受压应力-应变关系

Fig. 2 Compressive stress-strain relationship of concrete

单轴受拉塑性损伤因子 d_t :

$$d_t = 0, x \leq 1. \tag{2}$$

$$d_t = 1 - \sqrt{\frac{1}{a_t(x-1)^{1.7} + x}}, \quad x > 1. \tag{3}$$

式中: a_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段参数值,按《混凝土结构设计规范》中的表 C.2.3 取值, $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}$ 。

单轴受压塑性损伤因子 d_c :

$$d_c = 1 - \sqrt{\frac{\rho_c n}{(n-1) + x^n}}, \quad x \leq 1. \tag{4}$$

$$d_c = 1 - \sqrt{\frac{\rho_c}{a_c(x-1)^2 + x}}, \quad x > 1. \tag{5}$$

式中: $x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c,r}}, \rho_c = \frac{f_{c,r}}{E_0 \varepsilon_{c,r}}, n = \frac{E_0 \varepsilon_{c,r}}{E_0 \varepsilon_{c,r} - f_{c,r}}$ 。

根据《混凝土结构设计规范》的附录图 C.2.5 重复荷载作用下混凝土应力-应变关系(见图 2(a)),结合 ABAQUS 中混凝土损伤塑性模型受压应力-应变曲线(见图 2(b))。笔者提出了新的混凝土受压塑性损伤因子的

计算方法。

由图 2 可得:

$$E_r = (1 - d_c) E_0. \tag{6}$$

根据式(6)可得:

$$d_c = 1 - \frac{E_r}{E_0}. \tag{7}$$

E_r 的具体求法根据《混凝土结构设计规范》的附录 C.2.5 修正推导而来。

$$\sigma = E_r (\varepsilon - \varepsilon_z), \tag{8}$$

$$E_r = \frac{\sigma_{un}}{\sigma_{un} - \varepsilon_z}, \tag{9}$$

$$\varepsilon_z = \sigma_{un} - \frac{(\varepsilon_{un} + \varepsilon_{ca}) \sigma_{un}}{\sigma_{un} + E_c \varepsilon_{ca}}, \tag{10}$$

$$\varepsilon_{ca} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{un}} \sqrt{\varepsilon_c \varepsilon_{un}}. \tag{11}$$

式中: σ 为受压混凝土的压应力; ε 为受压混凝土的压应变; 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/再加载的变形模量; $\sigma_{un}, \varepsilon_{un}$ 分别为受压混凝土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。

1.1.3 附加应变的确定

滞回法则通过卸载段直线的斜率衰减来考虑混凝土的损伤^[12]。通过图 2(b),可以看出卸载段直线斜率为 E_r 。过镇海,江见鲸等^[13-14]研究指出混凝土的卸载刚度随损伤增加而降低。 E_r 和 d_c 结果对比如图 3 所示。通过图 3(b)得知利用能量法计算得到的混凝土受压损伤是逐渐增加,因而 E_r 是不断减小。

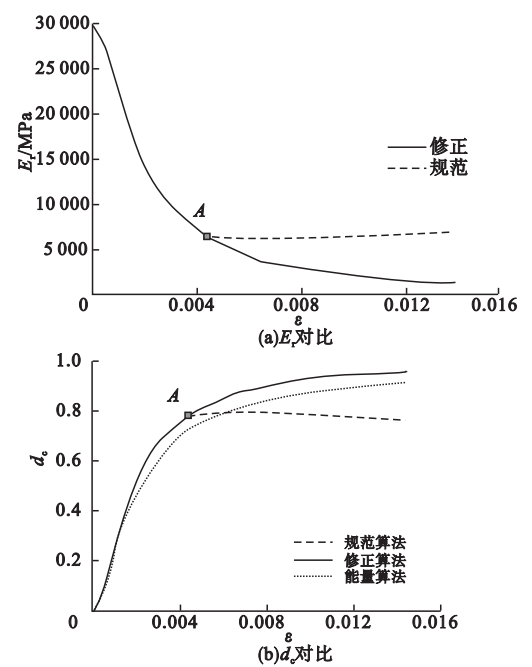


图 3 E_r 和 d_c 结果对比

Fig. 3 Comparison of E_r and d_c results

通过图 3(a)可以看出采用《混凝土结构设计规范》的附录 C.2.5 中的公式(C.2.5-4)求得(见图 3),在应变超过 A 点时出现了卸载段直线斜率上升的状况。对应图 3(b),出现混凝土损伤下降的状况。通过计算得知 A 点大概在 $3\varepsilon_c$ 左右。因而直接采用规范提出的 ε_{ca} (见式(12))求取 d_c 的与实际情况不符。

$$\varepsilon_{ca} = \max\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{un}}, \frac{0.09\varepsilon_{un}}{\varepsilon_c}\right) \sqrt{\varepsilon_c \varepsilon_{un}}. \quad (12)$$

通过研究发现,当采用式(13)时,修正附加应变之后得到的混凝土受压损伤是逐渐增加,不会出现卸载斜率上升的情况(见图

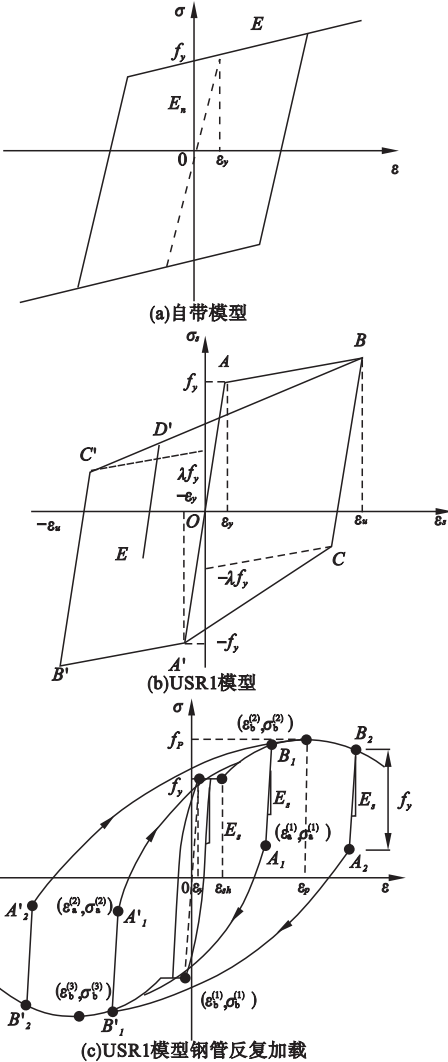
3)。因而笔者采用修正后的式(13)求 ε_{ca} 。

$$\varepsilon_{ca} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_{un}} \sqrt{\varepsilon_c \varepsilon_{un}}. \quad (13)$$

通过修正附加应变之后求出混凝土受压损伤曲线高于通过能量法求出的混凝土受压损伤,可以看出通过能量法求出的混凝土受压损伤低估了混凝土损伤。

1.2 钢筋的本构模型

大部分学者在模拟钢筋混凝土构件的受力性能时,钢筋本构采用 ABAQUS 自带双折线随动强化模型(见图 4(a),以下简称自带),笔者在文中采用王强等^[6]考虑包辛格效应的二折线动力强化模型(见图 4(b)),以下简称 USR1。



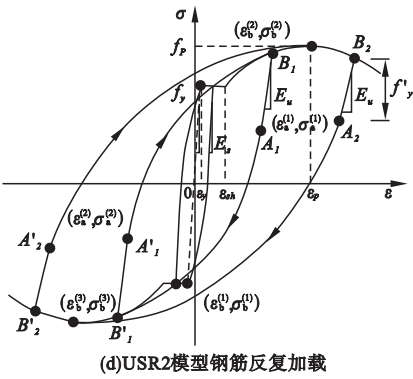


图4 钢筋应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curve of steel

在加载后期,采用 USR1 计算所得的曲线对于捏缩效应及强度下降现象反映不足. 因此文献[15]中提出了修正的汪训流本构模型,该本构关系可以较好地反映钢筋单调加载时的屈服、硬化和软化现象,并考虑了钢筋的 Bauschinger 效应. 此本构模型和 USR1 都较好地运用到梁、柱的滞回性能模拟中.

该本构的骨架曲线采用 Esmacily - Xiao 模型^[16],加卸载曲线采用 Légeron 等模型^[17]. 从骨架曲线 B_2 卸载时首先沿斜率为 E_s 的直线卸载 f_y 至 A_2 点,随后沿反向加载曲线 A_2B_1' 加载. A_2B_1' 由反向再加载曲线起点 A_2 指向骨架曲线上所经历的最小应变点 B_1' ,如图 4(c) 所示,并按式(14)、(15)确定.

$$\sigma = [E_s(\varepsilon - \varepsilon_a) + \sigma_a] - \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a} \right)^p \times [E_s(\varepsilon_b - \varepsilon_a) - (\sigma_b - \sigma_a)]. \quad (14)$$

$$p = \frac{E_s(1 - c/E_s)(\varepsilon_b - \varepsilon_a)}{E_s(\varepsilon_b - \varepsilon_a) - (\sigma_b - \sigma_a)}. \quad (15)$$

式中: c 为等效硬化直线的斜率,取过屈服点和峰值点直线的斜率; ε_a 、 σ_a 为再加载曲线起点的应变和应力; E_s 为钢筋的原点弹性模量.

在上述模型中,从骨架曲线卸载的直线段长度 B_1A_1 始终是一致的,对于材料塑性发展较大时的 Bauschinger 效应考虑不足,特别是当最大应变超过峰值应变时,会出现再加载曲线起点 A_2 的应力逐渐降低的现象. 并且在加卸载过程中直线段的斜率始终保持不

变,即未考虑钢筋的刚度退化,这与钢筋的实际受力情况有一定的差异.

依据文献[16],笔者进一步提出修正的钢筋本构模型(简称 USR2). 将前述钢筋本构模型中卸载直线段 B_2A_2 的斜率 E_u 按钢筋所经历的最大应变确定,如式(16)所示. 在加卸载过程中,当钢筋所经历的最大应变超过屈服应变时,卸载直线段 B_2A_2 的斜率随着最大应变的增大而降低. 这也间接地考虑到了钢筋与混凝土之间的滑移.

$$E_u = \left(0.82 + \frac{1}{5.55 + 1\,000(\varepsilon_{\max} - \varepsilon_y)} \right) E_s. \quad (16)$$

式中: ε_{\max} 为钢筋在骨架曲线上所经历的最大应变; ε_y 为钢筋的屈服应变.

对于前述钢筋本构模型中从骨架曲线卸载的直线段长度,同样考虑与钢筋所经历的最大应变相关. 当钢筋所经历的最大应变未超过骨架曲线上的峰值应变 ε_p 时,直线段 B_1A_1 长度 f'_y 等于钢筋的屈服强度 f_y ;当最大应变超过骨架曲线上的峰值应变 ε_p 时,直线段 B_2A_2 长度 f'_y 随最大应变的增大而减少,如图 4(d) 所示.

$$f'_y = \begin{cases} f_y & , \varepsilon_{\max} \leq \varepsilon_p; \\ f_y - 2 \left(\frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_p}{\varepsilon_{sh} - \varepsilon_p} \right)^2 (f_p - f_y) & , \varepsilon_{\max} > \varepsilon_p. \end{cases} \quad (17)$$

式中: ε_y 、 f_y 分别为钢筋的屈服应变和应力; ε_p 、 f_p 为钢筋骨架曲线上峰值点的应变和应力; ε_{sh} 为钢筋骨架曲线上硬化起点的应变; ε_{\max} 为钢筋骨架曲线上所经历的最大应变.

2 单元构型

为考虑计算精度和计算效率,通常在进行结构弹塑性分析中,采用壳单元模拟剪力墙构件. 笔者采用分层壳单元进行模拟剪力墙,钢筋的模拟用 * Rebar Layer 定义.

通过研究发现剪力墙边缘构件对结构抗震性能影响显著^[18-22]. 笔者考虑了边缘构件对结构的影响. 边缘构件采用杆单元进行

模拟,采用共节点技术。

3 研究结果分析

为验证模型的正确性,笔者对文献[19]的中钢筋混凝土剪力墙试件 SW1-1 的受力过程进行了往复荷载作用下的模拟。

3.1 混凝土本构模型研究

有限元模拟结果如图 5 所示。模型中钢筋本构均采用 USR2,混凝土本构模型中受拉损伤采用能量法求出,受压损伤分别采用能量方法和笔者方法求出。通过对比发现,采用笔者提出受压损伤计算方法求出的滞回曲线与实验曲线更接近,因而笔者提出的受压损伤计算方法更符合实际情况。

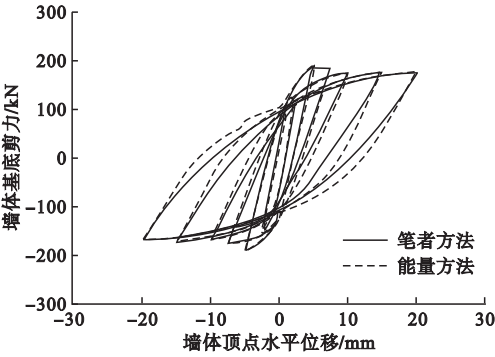


图 5 不同受压损伤计算方法的结果分析
Fig. 5 Analysis of different compression damage calculation methods

3.2 钢筋本构模型研究

SW1-1 计算结果与试验结果如图 6 所示。由图 6 可知,钢筋无论采用 ABAQUS 自带还是笔者自编本构,计算曲线滞回环峰值点均与试验曲线(见图 6(a))一致且都能较好地模拟剪力墙的滞回性能。但是钢筋采用 ABAQUS 自带本构所得滞回曲线比较丰满,而笔者给出的钢筋本构模型考虑了 Bauschinger 效应,计算结果与实测曲线更加接近。

通过图 6(d)的得出,在模拟剪力墙构件滞回性能时,钢筋采用 USR1 和 USR2 都较好地模拟了剪力墙滞回性能,且效果比较相近。USR2 可以较好地应用于混凝土结构中。

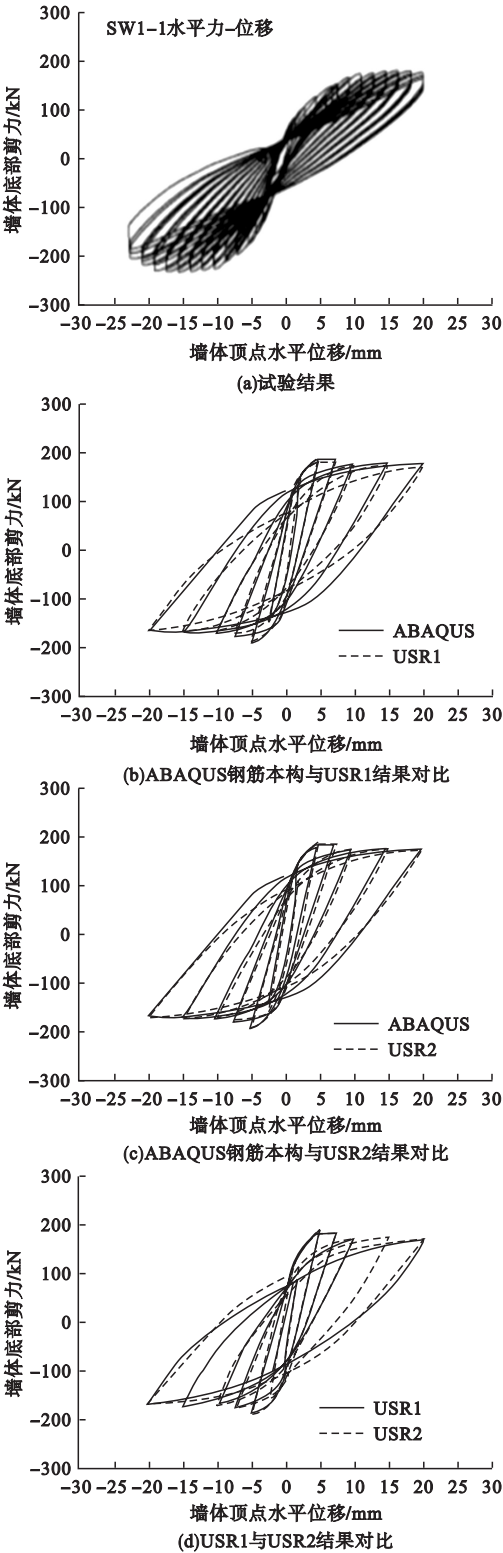


图 6 SW1-1 计算结果与试验结果比较
Fig. 6 Comparison of SW1-1 calculation results with experimental result

笔者采用的两种钢筋本构虽然能较好地模拟剪力墙的滞回性能,但是滞回曲线仍然比较饱满,需要进一步研究。

3.3 网格尺寸对非线性的影响

在采用有限元对钢筋混凝土进行非线性分析时,网格尺寸对计算结果的影响显著。笔者基于此原因展开研究,通过有限元模拟分析网格尺寸对钢筋混凝土非线性的影响。有限元模拟结果如图7所示。

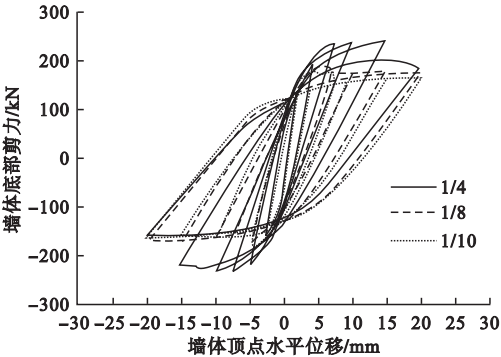


图7 不同单元划分的结果对比

Fig. 7 Comparison results of different unit divisions

笔者将上述模型分别按墙宽尺寸的1/4、1/8、1/10划分单元进行计算对比(见图7)。发现模型按墙宽尺寸的1/4划分,得出滞回结果的曲线峰值点明显高于模型按墙宽尺寸的1/8划分的结果,且与实验值偏差较大;模型按墙宽尺寸的1/8划分得出滞回曲线与模型按墙宽尺寸的1/10划分得出滞回曲线基本一致。因而模型的单元划分不宜划分太粗,否则导致结果不准确;单元划分也不宜太细,否则计算量太大。因此在计算模型时应充分考虑计算精度与计算效率,笔者建议壳单元模型按墙宽尺寸的1/8划分较为适宜。

4 结 论

(1)混凝土受压损伤的求法建议采用笔者提出的方法,通过混凝土规范中给出的求取出的混凝土受压损伤。

(2)采用混凝土规范的方法求混凝土附加应变 ϵ_{ca} 进而求 E_r ,会出现 E_r 上升和混凝土损伤下降的情况,建议采用笔者提出的混

凝土附加应变的求法。

(3)笔者采用2种钢筋本构模型均考虑了Bauschinger效应,所得滞回曲线较采用ABAQUS自带双折线随动强化模型计算所得滞回曲线更接近试验实测曲线。

(4)壳单元在进行网格尺寸划分时,建议单元尺寸划分为墙宽尺寸的1/8左右。

(5)笔者提出的混凝土本构和钢筋本构能够较好地模拟剪力墙的滞回性能,可以用于剪力墙结构的动力弹塑性分析。

参考文献

[1] 李伟琛,韩小雷,崔 济 东. 基于试验的ABAQUS混凝土塑性损伤参数取值方法[J]. 结构工程师,2016,32(2):64-69.
(LI Weichen, HAN Xiaolei, CUI Jidong. Determination of damage parameter of ABAQUS CDP model based on test data[J]. Structural engineers,2016,32(2):64-69.)

[2] 聂祺,李云贵,林春哲. 钢筋混凝土剪力墙非线性分析单元模型[J]. 工程力学,2010,27(11):71-75.
(NIE Qi,LI Yungui,LIN Chunzhe. A new element model for nonlinear analysis of reinforced concrete shear walls element model[J]. Engineering mechanics,2010,27(11):71-75.)

[3] 李志山,容柏生. 高层建筑结构在罕遇地震影响下的弹塑性时程分析研究[J]. 建筑结构,2006,36(增刊):142-149.
(LI Zhishan,RONG Bosheng. Research on elastic-plastic time-history analysis of tall building under expected rare earthquakes[J]. Building structure,2006,36(S):142-149.)

[4] 潘鹏,钱稼茹,周怡斌,等. 上海科技宇航有限公司大修机库弹塑性时程分析[J]. 建筑结构,2009,39(10):15-18.
(PAN Peng, QIAN Jiuru, ZHOU Yibin, et al. Elasto-plastic time history analyses of STARCO overhaul hangar[J]. Building structure,2009,39(10):15-18.)

[5] 崔焕平,崔燕平,王宗敏. 混凝土非线性有限元分析中的网格尺寸效应[J]. 混凝土,2007(6):27-29.
(CUI Huanping, CUI Yanping, WANG Zongmin. Mesh size effect in nonlinear finite element analysis of concrete [J]. Concrete,2007(6):27-29.)

[6] 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.)
- [7] 张劲,王庆杨,胡守营,等. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型参数验证[J]. 建筑结构, 2008, 38(8): 127 – 130.
(ZHANG Jin, WANG Qingyang, HU Shouying, et al. Parameters verification of concrete damaged plastic model of ABAQUS [J]. Building structures, 2008, 38(8): 127 – 130.)
- [8] 范浩,温四清,董卫国,等. 基于 ABAQUS 的混凝土剪力墙滞回性能的模拟[J]. 建筑结构, 2013, 43(增刊): 549 – 554.
(FAN Hao, WEN Siqing, DONG Weiguo, et al. Simulation of the hysteretic performance of the concrete shear wall in ABAQUS [J]. Building structures, 2013, 43 (S): 549 – 554.)
- [9] 雷拓,钱江,刘成清. 混凝土损伤塑性模型应用研究[J]. 结构工程师, 2008, 24(2): 22 – 23.
(LEI Tuo, QIAN Jiang, LIU Chengqing. Application of damaged plasticity model for concrete[J]. Structural engineers, 2008, 24(2): 22 – 23.)
- [10] 孙庆昭. ABAQUS 混凝土塑性损伤模型概述[J]. 重庆建筑, 2014(11): 70 – 72.
(SUN Qingzhao. An overview of plastic damage model of ABAQUS concrete [J]. Chongqing architecture, 2014(11): 70 – 72.)
- [11] 曹明. ABAQUS 损伤塑性模型损伤因子计算方法研究[J]. 交通运输研究, 2012, 24(2): 51 – 54.
(CAO Ming. Research on damage plastic calculation method of ABAQUS concrete damaged plasticity model [J]. Transport research, 2012, 24(2): 51 – 54.)
- [12] MOHAMAD A B A E, CHEN Z F. Experimental and numerical analysis of the compressive and shear behavior for a new type of self-insulating concrete masonry system [J]. Applied sciences, 2016, 6(9): 245.
- [13] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
(GUO Zhenhai. Reinforced concrete [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.)
- [14] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
(JIANG Jianjing, LU Xinzheng, YE Lieping. Finite element analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)
- [15] 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(增刊2): 100 – 105.
(WANG Qiang, ZHU Lili, 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.)
- [16] ESMAEILY A, XIAO Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads; analysis [J]. ACI structural journal, 2005, 102(5): 736 – 744.
- [17] LÉGERON F, PAULTRE P, MAZAR J. Damage mechanics modeling of nonlinear seismic behavior of concrete structures [J]. Journal of structural engineering, 2005, 131(6): 946 – 954.
- [18] 章红梅,吕西林,杨雪平,等. 边缘构件配箍对钢筋混凝土剪力墙抗震性能的影响[J]. 结构工程师, 2009, 24(5): 100 – 104.
(ZHANG Hongmei, Lü Xilin, YANG Xueping, et al. Influence of boundary stirrup on seismic behavior of reinforced concrete shear walls[J]. Structural engineers, 2009, 24(5): 100 – 104.)
- [19] 章红梅,曾松. 不同轴压比下剪力墙抗震性能试验研究[J]. 结构工程师, 2014, 30(5): 165 – 173.
(ZHANG Hongmei, ZENG Song. Experimental study on the seismic performance of shear walls under varied axial compression ratios [J]. Structural engineers, 2014, 30(5): 165 – 173.)
- [20] 刘国瑞. 表面内嵌 FRP 加固混凝土梁抗剪性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2012.
(LIU Guorui. Study on shear behavior of concrete beams strengthened with near-surface-mounted FRP [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2012.)
- [21] 贾庆扉. 混凝土梁表层嵌贴 CFRP 板条的抗剪加固试验研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
(JIA Qingfei. Experimental study on RC beams shear strengthened with NSM strips [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.)
- [22] 陈莉. 嵌贴 FRP 板材加固钢筋混凝土梁的试验研究[D]. 济南:济南大学, 2009.
(CHEN Li. Experimental study on RC beams shear strengthened with NSM laminates [D]. Jinan: Jinan University, 2009.)