

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.05.006

基于ABAQUS的混凝土梁柱节点非线性分析

万翱宙, 罗小勇, 梁岩

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 利用有限元软件 ABAQUS 对钢筋混凝土梁柱节点的承载力进行模拟及混凝土结构非线性分析, 并与已有的实验结果进行对比, 得出用 ABAQUS 中的 concrete damaged plasticity 可以较好地模拟构件的屈服荷载, 但在屈服位移上与实验结果有差异, 主要是因为忽略泊松比的降低及钢筋与混凝土粘结滑移增加了构件的截面刚度。

关键词: ABAQUS; 混凝土结构; 非线性

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)05-0025-05

Nonlinear Analysis of Concrete Beam-Column Joints Based on ABAQUS

Wan Aozhou, Luo Xiaoyong, Liang Yan

(College of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: Uses the finite element software ABAQUS to simulate the bearing capacity of reinforced concrete beam-column connections, and makes nonlinear analysis on its concrete structure. Compares the testing results with the existing experimental results, and shows that the model of concrete damaged plasticity in ABAQUS can better simulate the yield load of member, but its yield displacement is different with the experimental result, mainly due to the ignorance of Poisson's ratio decreased and the bond slip between concrete and reinforcement, which increases the section stiffness of members.

Keywords: ABAQUS; concrete structure; nonlinear analysis

0 引言

混凝土被作为一种建筑材料已有百余年历史, 因其使用方便、可塑性好、经济环保、高强耐久等优点而被应用于各领域。但由于混凝土是一种非匀质材料, 其力学性能复杂。因此, 对混凝土的各项力学性能以及受力机理的研究有着重要意义。目前, 对于混凝土的研究方式, 基本上是采用实验和数值模拟。实验结果比较直观, 而且可靠, 但是实验费用较高, 实验周期较长, 实验结果受实验条件的影

响较大。随着计算机技术和有限元模拟方法的发展, 数值模拟以其快速、低价、易于实现等诸多优点而成为研究混凝土结构性能的重要手段。然而要在有限元软件中尽可能准确地模拟混凝土这种材料不容易, 国内外学者提出了基于各种理论的混凝土本构模型^[1-3]。但是迄今为止, 还没有一种理论被公认为可以完全描述混凝土的本构关系^[4]。

ABAQUS 是大型通用有限元分析软件, 其强大的非线性分析功能获得了广大用户的认可, 特别是在结构分析领域, 其应用较广泛。ABAQUS 中的混

收稿日期: 2012-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178470)

作者简介: 万翱宙(1988-), 男, 湖北十堰人, 中南大学硕士生, 主要研究方向为锈蚀钢筋混凝土的抗震耐久性,

E-mail: 821544545@qq.com

混凝土损伤塑性模型 (concrete damaged plasticity), 使用各向同性损伤弹性结合各向同性拉伸和压缩塑性的模式来表示混凝土的非弹性行为, 是一个基于塑性的连续介质损伤模型^[5]。为验证该模型的有效性, 本研究将 Saenz 提出的混凝土全曲线模型应用到混凝土损伤塑性模型中, 利用 ABAQUS 对混凝土梁柱节点进行有限元建模分析, 并且将实验结果和分析结果进行了对比, 结果表明, 用 ABAQUS 中的 concrete damaged plasticity 可以较好地模拟混凝土构件的屈服荷载。

1 钢筋与混凝土的本构关系

在 ABAQUS 中, 混凝土结构中的钢筋可以通过钢筋单元实现, 钢筋单元采用一维应变杆单元。在模拟时, 钢筋和混凝土之间的力学性能相互独立, 单独建模。这 2 种材料共同工作的基础是他们之间有足够的粘结强度。ABAQUS 中的埋入单元 (embedded element) 技术可实现模拟混凝土结构中的钢筋。

1.1 钢筋的本构模型

本研究主要针对混凝土的非线性进行分析, 因此, 钢筋的本构关系仍然采用理想弹塑性模型, 如式 (1), 模型的本构关系见图 1。

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s, & \varepsilon_s \leq \varepsilon_y; \\ f_y, & \varepsilon_s > \varepsilon_y. \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_s 为钢筋应变; σ_s 为钢筋应力; ε_y 为钢筋的屈服应变; f_y 为钢筋的屈服应力。

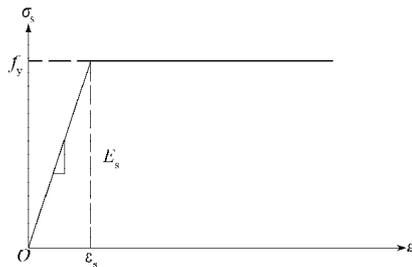


图1 钢筋本构关系

Fig. 1 Reinforced constitutive relation

图 1 中, 横坐标为钢筋应变 ε , 纵坐标为钢筋的应力 σ_s , 单位为 MPa。

1.2 混凝土的本构模型

Saenz 等人在 Elwi 和 Murry 工作的基础上提出了如下受压混凝土应力 - 应变关系通用全曲线^[6], 即

$$\sigma = \frac{E_0 \varepsilon_c}{1 + (R + E_0/E - 2)(\varepsilon_c/\varepsilon_0) - (2R - 1)(\varepsilon_c/\varepsilon_0)^2 + R(\varepsilon_c/\varepsilon_0)^3}, \quad (2)$$

式中:

$$R = \frac{E_0/E(\sigma_0/\sigma_{cu} - 1)}{(\varepsilon_{cu}/\varepsilon_0 - 1)^2} - \frac{1}{\varepsilon_{cu}/\varepsilon_0}, \quad (3)$$

其中, σ_0 为混凝土的峰值应力, ε_0 和 ε_{cu} 分别为混凝土峰值应变和极限应变; σ_{cu} 为对应于 ε_{cu} 处的应力水平, 分析中可以考虑为 $(0.80 \sim 0.85) \sigma_0$, ε_{cu} 可以取为 $0.003 \sim 0.004$;

E 为峰值应力对应的割线模量, 且 $E = \sigma_0/\varepsilon_0$;
 ε_c 为混凝土的应变。

根据式 (2), 可得受压混凝土的本构关系曲线如图 2 所示。

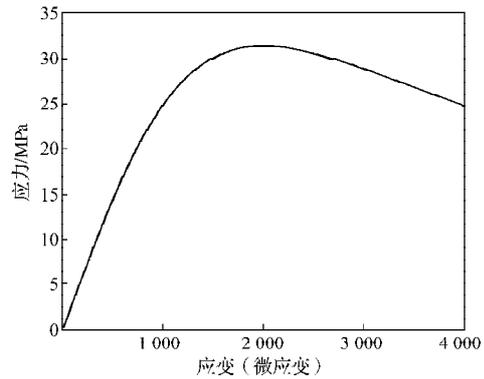


图2 受压混凝土本构关系曲线

Fig. 2 The constitutive relation curve of loaded concrete

图 2 中, 横坐标为混凝土的应变 $\mu\varepsilon (1 \times 10^{-6} \varepsilon)$, 纵轴表示混凝土应力 σ 。

混凝土受拉本构关系, 采用我国《混凝土结构设计规范》GB50010—2002 给出的分段式受拉应力 - 应变全曲线方程^[7], 即

上升段,

$$\sigma = f_t \left[1.2 \varepsilon/\varepsilon_{t,p} - 0.2 (\varepsilon/\varepsilon_{t,p})^6 \right], \quad (4)$$

下降段,

$$\sigma = f_t \frac{\varepsilon/\varepsilon_{t,p}}{\alpha_t (\varepsilon/\varepsilon_{t,p} - 1)^{1.7} + \varepsilon/\varepsilon_{t,p}}, \quad (5)$$

式中: f_t 为混凝土抗拉强度;

$\varepsilon_{t,p}$ 为峰值应变, 随着抗拉强度的增大而增大, 与抗拉强度间的经验回归关系为

$$\varepsilon_{t,p} = 6.5 \times 10^{-6} f_t^{0.54},$$

参数 α_t 亦随混凝土抗拉强度的增大而增大, 可按 $\alpha_t = 0.312 f_t^2$ 计算。

在 ABAQUS 中, 提供有损伤塑性模型, 该模型以各向同性损伤弹性结合各向同性拉伸和压缩塑性的模式来表示混凝土的非弹性行为。这是一个基于塑性的连续介质损伤模型。已有研究表明, 该模型可用于单向加载、循环加载以及动态加载等情况, 且

收敛性比较好^[5]。

2 建模方法

本文采用静态分析, 以非线性有限元分析软件 ABAQUS 建立钢筋混凝土的有限元模型。对钢筋混凝土单元来说, 其建模方法主要有以下几种^[8]:

1) 整体式建模法。这种建模方法中, 只建立混凝土单元, 将钢筋单元分布于整个混凝土单元中, 并假定混凝土和钢筋粘结良好, 把单元视为连续均匀材料。

这种建模方法简单, 但是不能逼真地反映混凝土和钢筋之间的受力性能。

2) 界面单元分离式建模法。这种建模方法把钢筋和混凝土单元当作不同的单元来处理, 不同的单元之间是分离的, 再用弹簧单元将其连接, 以模拟钢筋与混凝土的粘结滑移。

这种方法能够逼真地模拟钢筋和混凝土的实验力学行为, 但是其建模较复杂, 工作量较大, 且需要较长的计算时间。

3) 位移协调分离式建模法。这种建模方法分别对钢筋和混凝土单元进行处理, 再将钢筋和混凝土固结在一起, 并认为两者间没有相对滑移。

这种建模方法较简单, 但是不能逼真地模拟钢筋和混凝土的粘结滑移。

对于本实验, 由于主要是为了研究混凝土的力学性能, 所以钢筋和混凝土的粘结滑移可不予考虑。因此, 本研究中采用位移协调分离式方法建立模型。ABAQUS 中的埋入单元 (embedded element) 技术可实现模拟混凝土结构中钢筋和混凝土的连接。

3 单元类型

在本研究中, 因为混凝土梁柱节点从开裂到屈服阶段有一个较大的变形, 分析时会引起网格扭曲, 因此对混凝土单元的选取应采用线性缩减积分单元来模拟。钢筋在混凝土中主要承受拉力及压力, 在本研究中仅关注其轴向应力, 因此可选择相应的桁单元来进行模拟。

本实验中, 混凝土单元选用 8 节点六面体线型缩减积分的三维实体单元 C3D8R。这种单元的自由度较少, 可以在很大程度上减少计算时间, 并且可以避免使用完全积分产生的刚度过大, 而计算结果足以反映混凝土的实际应力应变。另外, 当网格存在扭曲变形时, 分析精度不会受到太大的影响, 不会出现剪力自锁现象; 模型的适应性较强。混凝土的

材料属性采用 ABAQUS 中的损伤混凝土材料属性, 可以较好地模拟混凝土的受力性能。

钢筋采用三维二节点线性桁架单元 T3D2, 该单元具有水平位移和垂直位移两个自由度。计算结果有足够的精度要求, 且计算代价小。

4 计算及建模

4.1 实验参数

本实验模拟混凝土简支梁节点在荷载作用下的性能, 实验加载时, 作用于梁中间的柱节点之上。混凝土的强度等级为 C30, 梁柱纵向受力钢筋选用 HRB335, 其直径为 16 mm。梁柱箍筋采用 HPB235, $\Phi 8@100$, 节点区加密箍筋 $\Phi 8@80$ 。试件尺寸及配筋详图如图 3 所示。

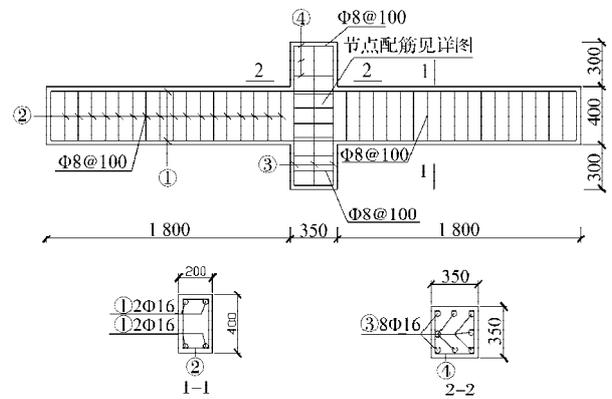


图3 试验试件配筋详图

Fig. 3 Specimen Reinforcement detail of experiment

实验用钢筋与混凝土的具体参数见表 1 和 2。

表 1 混凝土性能指标

Table 1 Concrete performance index

立方体抗压强度 / MPa	弹性模量 / MPa	泊松比
30	30 000	0.2
轴心抗压强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	密度 / (kg · m ⁻³)
24.5	3.1	2 500

表 2 钢筋材料参数表

Table 2 Reinforcement material parameter list

钢筋种类	直径	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	弹性模量 / GPa
HPB235	Φ8	292	441	2.080
HRB335	Φ16	426	557	1.775

4.2 有限元模型

用 ABAQUS 建立钢筋混凝土的有限元模型, 并进行网格划分。为了防止混凝土梁局部受压破坏^[9], 导致计算结果不收敛, 在支座和加载点均设置刚度很大的垫块。本实验的有限元模型如图 4 所示, 实际

试验模型如图5所示。

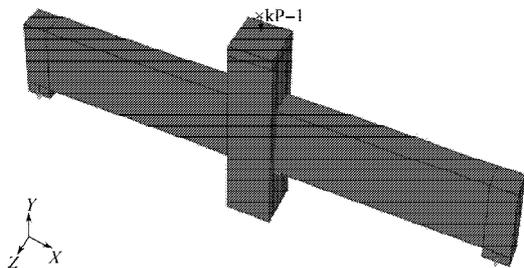


图4 有限元模型

Fig. 4 Finite element model

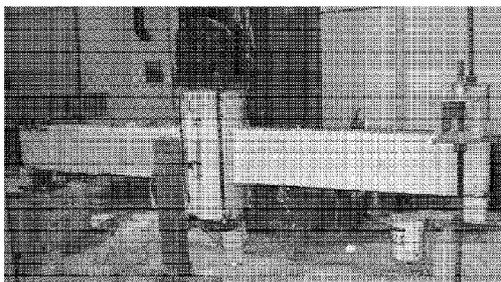


图5 实验模型

Fig. 5 Experimental model

4.3 后处理结果

对模型进行加单调荷载实验，当施加的单调荷载较小（小于13 kN）时，混凝土的应力云图如图6中的a所示。此时，混凝土仍处于弹性工作阶段，未出现裂缝。随着荷载的不断增大，梁的变形逐渐加快，当荷载加至32 kN时，梁的根部开始开裂，如图6中的b所示。这一结果与实验结果基本符合。

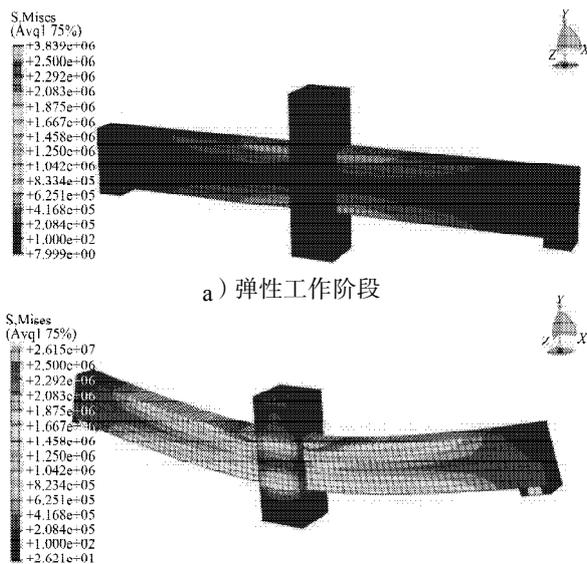


图6 试件应力云图

图6 Specimen stress nephogram

图7所示为实验所得混凝土构件荷载挠度曲线。其中横坐标表示梁柱节点的跨中挠度，纵坐标表示

跨中的荷载值。

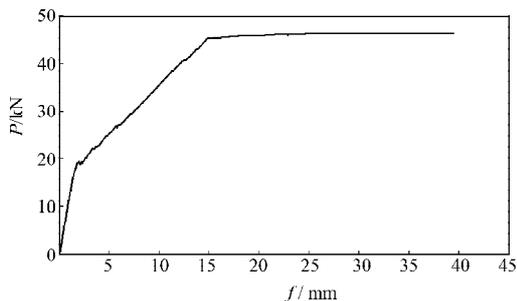


图7 混凝土构件荷载挠度曲线

Fig. 7 Concrete member load immunity curve

由图7可看出，当混凝土构件所受荷载小于20 kN时，梁的挠度和荷载基本呈线性关系，表明此时混凝土未开裂，构件处于弹性工作阶段；当所受荷载大于20 kN而小于45 kN时，曲线的斜率减小，主要是混凝土开裂，受拉区混凝土退出工作，截面的有效高度减小，中和轴上移导致截面的抗弯刚度退化；当荷载大于46.36 kN时，随着挠度的增加，荷载基本保持不变，此时在梁的根部出现了塑性铰。这些均与实际的实验现象基本一致。

有限元模拟中，为了节省计算时间，未考虑梁的自重荷载，梁的自重荷载为6.6 kN，考虑重力荷载时，其实际屈服强度为52.96 kN。

4.4 有限元分析结果与实验结果对比

ABAQUS 计算所得和实验所得材料的屈服荷载与屈服挠度结果见表3。

表3 ABAQUS 计算结果与实验结果对比
Table 3 The comparison of ABAQUS calculated result and experimental result

项目	屈服荷载 /kN	屈服挠度 /mm
ABAQUS 计算结果	52.96	18.89
实验结果	52.00	27.00

从表3中可以看出：

- 1) 对于屈服荷载，两者所得结果较吻合，这表明 ABAQUS 可以较精确地模拟构件的屈服荷载；
- 2) ABAQUS 计算的屈服挠度比实验结果低得多（低30%），也就是说有限元模型比实际构件硬，这主要是因为 ABAQUS 在计算时假定泊松比是固定不变的，而实际上，随着混凝土的开裂，混凝土的泊松比是逐渐增加的，因此，ABAQUS 有限元模型的截面刚度较实际情况大。在有限元模拟中采用埋入式单元，不考虑钢筋与混凝土的粘结滑移，假定两者粘结力无限大，该假定也增加了模型的截面刚度，使得计算结果与实际结果相差较大。

5 结论

1) 通过对 ABAQUS 的计算结果进行分析, 可知其结果与实际试验现象能较好地吻合, 因而证明了 ABAQUS 软件中的 concrete damaged plasticity 能较好地模拟混凝土的力学性能。

2) 对 ABAQUS 计算结果和实验结果进行对比, 得出 ABAQUS 能较精确地模拟出构件的屈服荷载, 并可得出钢筋混凝土梁抗弯性能的各种特征值。因此, 文中所采用的钢筋和混凝土材料的本构关系模型基本能反映钢筋和混凝土在单调荷载下的力学基本性质。

3) 在实际模拟结构的屈服荷载对应的挠度时, 应考虑建模的基本假定对构件截面的抗弯刚度的影响。本实验模型中假定混凝土梁在荷载作用下其泊松比不变, 而实际上, 随着裂缝的加大, 梁的泊松比逐渐增加, 这一假定导致计算结果比实验结果偏小。其次, 未考虑钢筋与混凝土之间的剪切滑移, 认为钢筋与混凝土之间始终不出现滑移, 这同样增加了截面的抗弯刚度, 从而导致计算结果比实际结果偏小。因此, 实际建模时应对这些因素予以考虑。

参考文献:

- [1] Qian Xiaoqian, Li Zongjin. The Relationships between Stress and Strain for High-Performance Concrete with Metakaolin[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(11): 1607-1611.
- [2] Gopalaratnam V S, Surendra P S. Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension[J]. ACI Journal, 1985, 82(3): 310-323.
- [3] 高丹盈, 张煜钦. 混凝土拉伸应力应变关系[J]. 工业建筑, 1992(12): 21-25.
- [4] 刘劲松, 刘红军. ABAQUS 钢筋混凝土有限元分析[J]. 装备制造技术, 2009(6): 69-70.
- [5] Liu Jingsong, Liu Hongjun. ABAQUS Finite Element Analysis of Reinforced Concrete[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(6): 69-70.
- [6] 方秦, 还毅. ABAQUS 混凝土损伤塑性模型的静力性能分析[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2007, 8(3): 254-260.
- [7] Fang Qin, Huan Yi. The Static Analysis of ABAQUS Concrete Damage Plastic Model[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 8(3): 254-260.
- [8] 何政, 欧进萍. 钢筋混凝土结构非线性分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2007: 6-10.
- [9] He Zheng, Ou Jinping. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structure[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2007: 6-10.
- [10] 江见鲸, 李杰, 金伟良. 高等混凝土结构理论[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 38-41.
- [11] Jiang Jianjing, Li Jie, Jin Weiliang. Advanced Concrete Structure Theory[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2007: 38-41.
- [12] 魏翔. 基于 ABAQUS 的混凝土结构非线性有限元分析[J]. 山西建筑, 2011, 37(2): 32-33.
- [13] Wei Xiang. On Nonlinear Finite Element Analysis of Concrete Structure Based on ABAQUS[J]. Shanxi Architecture, 2011, 37(2): 32-33.
- [14] 王玉琢, 傅传国. ABAQUS 结构工程分析及实例详解[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 123-126.
- [15] Wang Yuzhuo, Fu Chuanguo. ABAQUS Structure Engineering Analysis and Detailed Examples[M]. Beijing: China Building Industry Press, 2010: 123-126.

(责任编辑: 廖友媛)