

文章编号: 1000-4750(2014)09-0190-08

考虑箍筋约束效应的快速轴压加载下 钢筋混凝土短柱性能数值分析

曾 翔^{1,3}, 许 斌^{1,2}

(1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点实验室, 长沙 410082; 3. 海南大学土木建筑工程学院, 海口 570228)

摘 要: 为了研究在地震作用下应变率效应对约束钢筋混凝土轴压短柱力学性能的影响, 该文建议了同时考虑应变率效应和箍筋约束效应的混凝土塑性模型等效单轴受压本构曲线, 建立了分析约束钢筋混凝土轴压短柱在快速加载下动力行为的有限元模型。通过模拟结果与文献中试验研究结果比较, 表明该模型可有效描述约束钢筋混凝土短柱在地震作用下考虑混凝土材料应变率敏感性时的力学性能, 建议的等效单轴受压本构曲线是合理的。利用该有限元模型, 分析了配置箍筋构形、箍筋间距和纵筋配筋率这三个可影响约束效应的参数对约束钢筋混凝土短柱在考虑率效应时的力学性能的影响。结果表明随应变率的提高, 轴压短柱的承载力明显提高, 但延性降低, 力-轴向变形曲线下降段变陡。箍筋构形、间距以及纵筋配筋率对约束钢筋混凝土轴压短柱的动力力学性能具有重要的影响。

关键词: 钢筋混凝土短柱; 有限元分析; 动力性能; 应变率效应; 约束效应; 约束混凝土等效单轴受压本构曲线
中图分类号: TU375.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.04.0325

NUMERICAL SIMULATION ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF SHORT RC COLUMNS SUBJECTED TO CONCENTRIC RAPID LOADING CONSIDERING CONFINEMENT EFFECT OF STIRRUPS

ZENG Xiang^{1,3}, XU Bin^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: In order to investigate the behaviour of laterally confined short RC columns considering strain rate effects under dynamic loadings such as earthquake excitations, an equivalent stress-strain relationship of concrete considering both the strain rate sensitivity of concrete materials and the confinement effect of stirrups was introduced to a concrete plastic-constitutive model and the dynamic behaviour of laterally confined short columns under rapid loadings was simulated with a finite element model. The finite element analysis model was validated by comparing the numerically simulated behaviour with experimental data and was able to describe the response of the laterally confined short columns under dynamic loadings with acceptable accuracy. The result showed that the proposed equivalent uniaxial compression stress-strain relationship of concrete is rational. Based on the proposed analysis model, the influence of the following three parameters including the configuration, the spacing of stirrups and the ratio of longitudinal reinforcement on the behaviour of laterally confined short columns considering both strain rate effect and confinement effect was studied. The simulation results show that the axial load carrying capacity increases with the strain rate increasing, but the ductility decreases with the strain rate increasing and the descending branch of the relationship of axial carrying capacity versus axial deformation become sharper. The three parameters studied here have an important effect on the dynamic behaviour of laterally

收稿日期: 2013-04-13; 修改日期: 2013-06-06

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90715033); 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91015007)

通讯作者: 许 斌(1972—), 男, 湖北孝感人, 教授, 博士, 博导, 从事结构动力非线性行为与识别研究(E-mail: binxu@hnu.edu.cn).

作者简介: 曾 翔(1983—), 男, 湖南邵东人, 博士生, 从事钢筋混凝土结构动力行为研究(E-mail: zengx1983@163.com).

confined RC columns considering strain rate effects.

Key words: short RC columns; finite element analysis; dynamic behavior; strain rate effect; confinement effect; equivalent uniaxial compression stress-strain relationship of confined concrete

一般认为在地震下,工程结构材料的应变率约在 $10^{-4}/s \sim 10^{-1}/s$ 范围内^[1-3]。现有研究表明^[3-10],混凝土和钢筋的材料在此应变率范围内具有不同程度的应变率敏感性。文献[11]分析了地震作用下考虑材料应变率效应的钢筋混凝土结构的响应,结果表明混凝土材料的应变率效应对结构在不同的破坏机制下的承载力产生不同的影响。钢筋混凝土柱作为混凝土结构中基本的构件,深入研究应变率效应对混凝土柱的力学性能的影响,为合理评估地震作用下结构的力学行为和有效指导结构抗震设计具有重要意义。

文献[12-17]对钢筋混凝土柱在恒定轴力和横向快速加载下的力学性能进行了研究,试验和数值模拟结果表明在地震应变率范围内,动载抗弯和抗剪承载力均明显提高,但破坏模式没有明显区别。文献[14]的试验结果还表明,在较小的加载幅值下,动载等效阻尼因子比静载高。文献[15]对低约束效应的钢筋混凝土柱进行了地震作用下的反复快速加载试验研究。各级循环加载峰值速度为 $254\text{mm/s} \sim 1016\text{mm/s}$ 。试验结果表明加载率效应使侧向承载力提高 33%,使循环加载下的损伤和抗剪强度退化增加,加载率对破坏模式无明显影响。文献[1,18-22]对不同长细比的轴心和偏心受压构件在轴向快速加载下的力学性能进行了研究,结果表明加载率使构件的承载力明显提高。但上述研究没有考虑箍筋约束效应的影响。

在较高的体积配箍率下,存在约束效应的混凝土的静力强度比素混凝土强度会有明显的提高。在一定的材料应变率条件下,箍筋约束效应下的混凝土力学性能是一个值得研究的课题。文献[23]对足尺的方形钢筋混凝土短柱在高应变率($0.0167/s$)下的行为进行了试验研究,研究参数包括箍筋构形及体积配箍率,纵筋分布及配筋率,加载率及偏心率。文献[24]假定短柱截面轴压应变均匀一致,轴力等于常应变率下混凝土和钢筋所受压力之和,基于试验得到的某一应变率下($0.0167/s$)经验的箍筋约束混凝土应力-应变关系,对文献[23]的试验进行预测。文献[25]对 30 个钢筋高强混凝土圆形和方形截面短柱进行了轴压试验,考虑不同的约束箍筋构

形、箍筋强度、混凝土强度以及应变率($0.0167/s$)的影响。

高体积配箍率钢筋混凝土柱,在钢筋混凝土结构中广泛使用。尤其是短柱,常配置较多的箍筋以保证其具有较好延性。为了把握此类结构在地震作用下的响应,研究考虑率效应的约束钢筋混凝土短柱的行为具有重要意义。目前,只见少量文献[23,25]对约束钢筋混凝土柱的轴压动态行为进行试验研究,在数值分析研究方面采用的是简化的纤维模型^[24],不利于进行更复杂的力学性能分析,还未见关于考虑箍筋约束效应和应变率效应的钢筋混凝土柱的动力有限元分析研究的文献报道。本文提出了考虑应变率效应和箍筋约束效应的混凝土等效受压应力-应变曲线,并将其引入混凝土塑性模型,利用 ABAQUS 有限元分析软件建立了分析考虑箍筋约束效应的钢筋混凝土短柱快速加载性能的有限元模型。有限元模型的准静态和动态分析结果与试验结果符合良好,验证模型的短柱体积配箍率范围为 $0.007 \sim 0.039$ 。在此基础上,通过数值模拟研究了箍筋构形、箍筋间距、纵筋配筋率对考虑应变率效应和约束效应的钢筋混凝土轴压短柱力学行为的影响。

1 有限元模型

为了避免隐式分析在动力分析中难收敛的问题,采用 ABAQUS/Explicit 显式分析建模,对构件在准静态和快速加载下的力学性能进行数值分析。

1.1 混凝土的本构模型

混凝土本构模型采用 ABAQUS 提供的损伤塑性模型模块中的塑性模型^[26]。模型中参数(膨胀角、流动偏心参数、双轴等压受压与单轴受压强度比、拉压子午线第二应力不变量之比和粘性系数)采用 ABAQUS 默认值^[26]。本文假定动态下混凝土弹性模量为常数,取 $4730\sqrt{f_c}$ ^[27]。混凝土的动态泊松比参考文献[5]取 0.2。

1.1.1 箍筋约束混凝土等效受压应力-应变关系

本文建议的适合于 ABAQUS 有限元分析的箍筋约束混凝土等效应力-应变关系曲线如式(1)所示,其表达式形式参考了文献[28]的单轴受压应力-

应变曲线的形式,图1给出了未约束混凝土单轴受压应力-应变曲线和式(1)描述的约束混凝土应力-应变曲线的比较及式(1)中涉及的部分符号的含义。

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

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{co}}; \quad y = \frac{\sigma}{\sigma_{co}} \quad (2)$$

$$\alpha_a = 2.4 - 0.0125\sigma_{co} \quad (3)$$

$$\alpha_d = \frac{\varepsilon_{cc50} / \varepsilon_{co}}{(\varepsilon_{cc50} / \varepsilon_{co} - 1)^2} \quad (4)$$

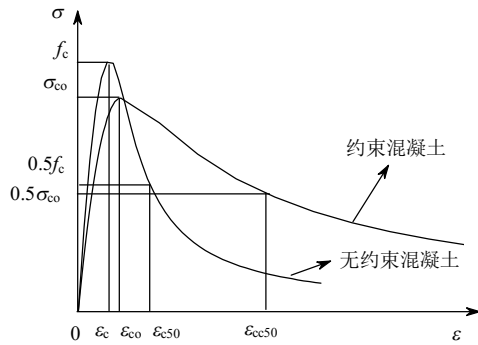


图1 约束混凝土等效应力-应变曲线

Fig.1 Equivalent stress-strain relationship of confined concrete

式(1)中参数 α_a 控制应力-应变曲线的上升段坡度,参数 α_d 控制应力-应变曲线的下降段趋势。式(2)和图1中, σ 和 ε 为约束混凝土应力和应变, σ_{co} 和 ε_{co} 为约束混凝土峰值应力及其对应的应变。参考文献[27, 29-30],考虑柱尺寸、截面形状和浇注方法等因素与标准圆柱体试件的差异, σ_{co} 取值考虑0.85的折减系数,取 $\sigma_{co} = 0.85f_c$, f_c 为混凝土圆柱体抗压强度。 ε_{co} (见式(5))为峰值应力对应的应变。式(4)中 ε_{cc50} (见式(10))为应力下降到峰值应力的50%时对应的应变。

$$\varepsilon_{co} = (1300 + 12.5 \cdot \sigma_{co}) \cdot 10^{-6} + 800 \cdot \xi^{0.2} \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

$$\xi = \rho_v f_h / \sigma_{co} \quad (6)$$

$$f_h = \begin{cases} f_h = f_{hy}, & \kappa \leq 10 \\ f_h = \min\left(f_{hy}, \frac{0.25\sigma_{co}}{\rho_{sey}(\kappa - 10)}\right), & \kappa > 10 \end{cases} \quad (7)$$

式(5)用于考虑箍筋约束效应对混凝土峰值应力对应的应变的影响。式(6)中 ξ 为约束效应系数, ρ_v 为体积配箍率。式(7)采用了文献[30]建议的表达式, f_h 为约束混凝土达到峰值应力时箍筋应力,其中 f_{hy} 为箍筋屈服强度, ρ_{sey} 为约束钢筋的有效截面比(见式(9)), κ 为判断混凝土达到峰值应力时箍筋

是否屈服的参数。

$$\kappa = \sigma_{co} / (\rho_{sey} E_s \varepsilon_c) \quad (8)$$

式(8)中: E_s 为钢筋弹性模量; ε_c 为圆柱体单轴抗压强度对应的应变,参考CEB-FIP Model Code 1990^[4]取0.0022。

$$\rho_{sey} = k_e A_{shy} / sc \quad (9)$$

式中: k_e 为有效约束系数,参见Mander(1988)^[31]建议的表达式; A_{shy} 为截面垂直于边长方向的箍筋截面面积; s 为箍筋间距; c 为截面最外侧的箍筋肢中心距。

$$\varepsilon_{cc50} = \varepsilon_{c50}(1 + 24I_{e50}) \quad (10)$$

式中: ε_{c50} 为无约束混凝土应力下降到峰值应力50%时的应变,参考文献[30]的建议, $\varepsilon_{c50} = 0.004$ 。 I_{e50} 为应变达到 ε_{cc50} 时的有效约束指标,表达式如下:

$$I_{e50} = \rho_{sey} f_{hy} / \sigma_{co} \quad (11)$$

在式(1)的基础上,采用混凝土动态强度以考虑材料的应变率效应,得到混凝土材料考虑应变率效应的应力-应变曲线。混凝土动态强度参考CEB-FIP Model Code 1990^[4]建议的计算公式如下:

$$\begin{cases} f_{cd} / f_{cs} = \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{cs}}\right)^{1.026\alpha_s} & \dot{\varepsilon} \leq 30s^{-1} \\ f_{cd} / f_{cs} = \gamma_s \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{cs}}\right)^{1/3} & \dot{\varepsilon} > 30s^{-1} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\alpha_s = 1 / (5 + 9f_{cs} / f_{co})$; $\log \gamma_s = 6.156\alpha_s - 2$; $f_{co} = 10\text{MPa}$; $\dot{\varepsilon}_s = -30 \times 10^{-6} s^{-1}$; f_{cd} 和 f_{cs} 分别表示动态圆柱体抗压强度和静态圆柱体抗压强度。

1.1.2 混凝土单轴受拉模型

混凝土的单轴受拉行为采用基于断裂能开裂准则的应力-断裂能关系。静态断裂能采用CEB-FIP Model Code 1990^[4]建议的公式:

$$G_F = G_{FO} (f_c / f_{co})^{0.7} \quad (13)$$

式中, G_{FO} 为混凝土断裂能基础值,取决于混凝土最大骨料粒径。文献[4]以表格形式给出了三种最大骨料粒径为8mm、16mm和32mm的混凝土对应的 G_{FO} 分别为 $0.025\text{N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$ 、 $0.030\text{N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$ 和 $0.058\text{N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$ 。验证模型用的文献[23]、文献[29]和文献[32]中最大骨料粒径分别为20mm、10mm和13mm,基于最大骨料粒径线性插值得到相应的 G_{FO} 分别为 $0.037\text{N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$ 、 $0.02813\text{N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$ 和 $0.02625\text{N} \cdot \text{mm}/\text{mm}^2$ 。

根据文献[33-35]对断裂能的研究,对本文研

究的地震作用下的应变率范围内，断裂能的应变率效应不明显，断裂能取常数，与静态断裂能一致。

1.2 钢筋本构模型

钢材采用等向弹塑性模型。钢筋的静态单轴应力-应变关系采用双折线线性强化模型，强化模量为弹性模量的 1%。文献[9-10]研究表明钢筋的弹性模量与应变率无关，因而取常数。钢筋屈服强度的动力增大系数采用 Cowper-Symonds 方程：

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/q} \quad (14)$$

式中参数 C 和 q 参考文献[36]模拟钢节点快速加载性能的建议值，分别取 $1300s^{-1}$ 和 5。

1.3 单元类型及网格划分

混凝土采用 Explicit 单元库中的 8 节点线性减缩积分实体单元 C3D8R，钢筋采用 Explicit 单元库中两节点三维桁架单元 T3D2。采用 25mm 全局种子控制尺寸划分网格。有限元网格划分如图 2 所示。

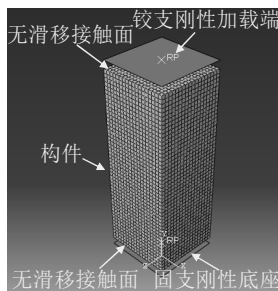


图 2 网格划分及边界条件

Fig.2 A schematic view of the element divisions and boundary condition

1.4 接触定义、边界条件

钢筋通过 embedded 方式嵌入到混凝土，不考

虑钢筋与混凝土的粘结滑移。由于试验加载装置的刚度非常大，采用刚体模拟试验装置的底座和加载端。底座采用固支边界条件，加载端采用铰支边界条件(如图 2)。底座及加载端与短柱端部之间的接触采用通用接触算法，假定摩擦无穷大，接触面之间无滑移。

2 有限元模型验证

验证有限元模型采用的试验数据来自于文献[23, 29, 32]，如表 1 所示，涉及三种箍筋配置形式，体积配箍率范围在 0.007~0.0309，加载形式包括准静态(应变率为 $3.0 \times 10^{-5}s^{-1}$)和快速加载(应变率为 $0.0167s^{-1}$)。图 3 给出了各构件轴压荷载-轴向变形(或平均应变)曲线的有限元模拟结果与试验结果比较，可以看出模拟结果与试验结果总体吻合良好。由于文献给出的快速加载下的全曲线结果有限，因此图 3 中部分比较图只给出了模拟曲线与承载力的对比。表 2 给出了轴压承载力及其对应的轴向变形的试验值与模拟值的比较，可以看出除试件 L8S5.5S5.5 的模拟准静态承载力误差较大外(14%误差)，其余短柱承载力模拟的误差最大在 6%以内，平均误差为 0.3%，方差为 0.003。对承载力对应的轴向变形的模拟误差稍大些，但总体上在可接受范围，平均误差为 13.3%左右，方差为 0.161。本模型对承载力以及所对应的轴向变形的预测效果较好，模拟曲线的趋势与试验曲线的趋势基本一致。通过与试验结果的对比表明本模型可有效的预测考虑箍筋约束效应的钢筋混凝土短柱的准静态和快速加载下的力学性能。

表 1 试验短柱截面属性

Table 1 Section properties of tested short column

| 试件编号 | 加载形式 | 配筋形式 | 截面尺寸/ (mm×mm) | 圆柱体抗压强度 f_c /MPa | 纵筋截面面积 A_{sl} /mm ² | 纵筋屈服强度 f_y /MPa | 体积配箍率 ρ_s | 箍筋屈服强度 f_{yh} /MPa |
|----------------------------|------|------|------------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------|-------------------------|
| L8S5.5S10 ^[29] | 准静态 | | 200×200 | 19.6 | 1032 | 420 | 0.007 | 550 |
| L8S5.5S5.5 ^[29] | 准静态 | | | 19.6 | 1032 | 420 | 0.012 | 550 |
| L8S5.5S3 ^[29] | 准静态 | | | 19.6 | 1032 | 420 | 0.022 | 550 |
| Unit2 ^[23] | 准静态 | | 450×450 | 25.3 | 3768 | 434 | 0.0182 | 309 |
| Unit3 ^[23] | 快速 | | | 25.3 | 3768 | 434 | 0.0182 | 309 |
| Unit14 ^[23] | 快速 | | | 24.8 | 3768 | 434 | 0.0224 | 296 |
| Unit15 ^[23] | 快速 | | | 24.8 | 3768 | 434 | 0.0309 | 296 |
| Unit6 ^[23] | 准静态 | | | 25.3 | 3619 | 394 | 0.0174 | 309 |
| Unit7 ^[23] | 快速 | | 450×450 | 25.3 | 3619 | 394 | 0.0174 | 309 |
| Unit19 ^[23] | 快速 | | 450×450 | 24.8 | 3619 | 394 | 0.0213 | 296 |
| A1 ^[32] | 准静态 | | 305×305 | 33.8 | 2271 | 490 | 0.0207 | 441 |
| D1 ^[32] | 准静态 | | 305×305 | 33.8 | 2271 | 490 | 0.0121 | 441 |

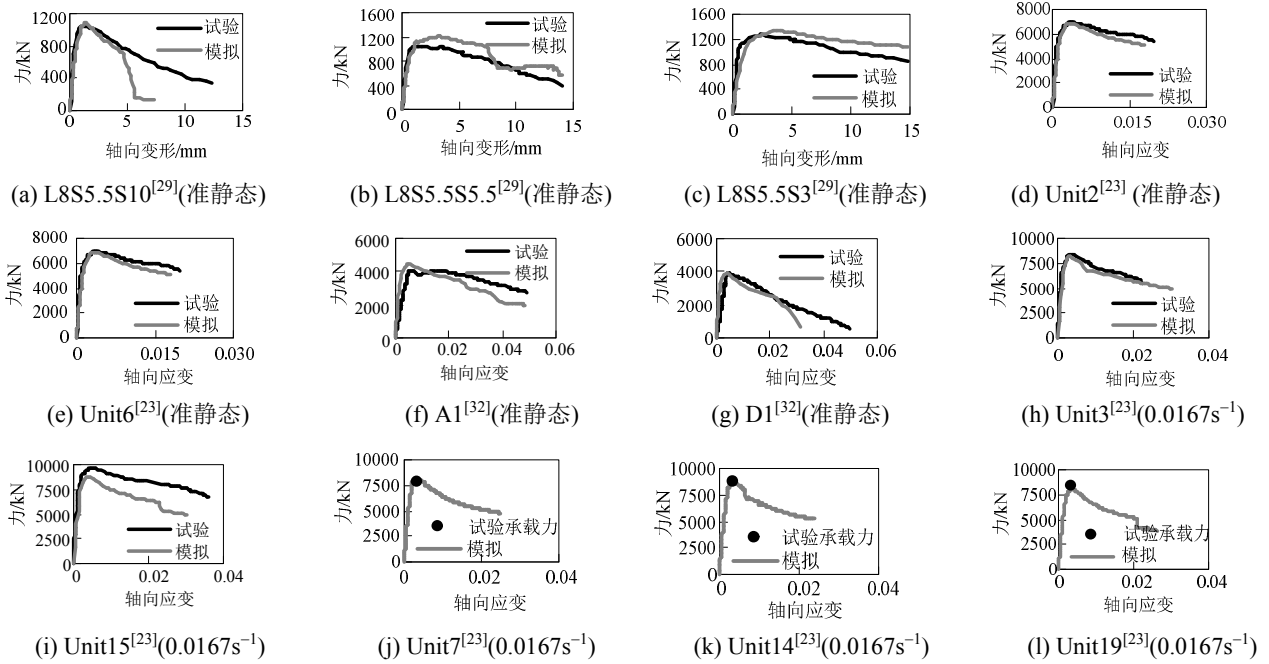


图 3 模拟结果与试验结果对比

Fig.3 Comparison between simulation and test results

表 2 轴压承载力及其对应变形试验值与模拟值比较

Table 2 Comparison of tested and predicted values of bearing capacity and corresponding axial deformation

| 试件 | P_e/kN | P_s/kN | P_s/P_e | D_e/mm | D_s/mm | D_s/D_e | |
|------------|----------|----------|-----------|----------------|----------------|---------------------------|-------|
| | | | | 或 ϵ_e | 或 ϵ_s | 或 ϵ_s/ϵ_e | |
| L8S5.5S10 | 1050 | 1081 | 1.03 | 1.35 | 1.37 | 1.02 | |
| L8S5.5S5.5 | 1055 | 1201 | 1.14 | 1.50 | 3.29 | 2.19 | |
| L8S5.5S3 | 1272 | 1336 | 1.05 | 2.30 | 3.75 | 1.63 | |
| 准静载 | Unit2 | 7070 | 6883 | 0.97 | 0.0036 | 0.0034 | 0.94 |
| | Unit6 | 6720 | 6684 | 0.99 | 0.0044 | 0.0044 | 1.00 |
| | A1 | 4317 | 4447 | 1.03 | 0.0061 | 0.0050 | 0.82 |
| | D1 | 4094 | 3884 | 0.95 | 0.0046 | 0.0038 | 0.83 |
| 快速加载 | Unit3 | 8410 | 8196 | 0.97 | 0.0030 | 0.0034 | 1.13 |
| | Unit7 | 7850 | 8070 | 1.03 | 0.0032 | 0.0036 | 1.125 |
| | Unit14 | 8800 | 8685 | 0.987 | 0.0033 | 0.00327 | 0.991 |
| | Unit15 | 9400 | 8792 | 0.94 | 0.0052 | 0.0040 | 0.77 |
| | Unit19 | 8400 | 7972 | 0.949 | 0.0032 | 0.00366 | 1.144 |
| | 均值 | | | 1.003 | | | 1.133 |
| | 方差 | | | 0.003 | | | 0.161 |

注: P_e 和 $D_e(\epsilon_e)$ 为轴压承载力及其对应的轴向变形(平均应变)试验值; P_s 和 $D_s(\epsilon_s)$ 为轴压承载力及其对应的轴向变形(平均应变)模拟值。

3 参数分析

采用上述有限元模型,对截面的配箍构形,箍筋间距,纵筋配筋率对轴压短柱考虑应变率效应的力学行为的影响进行参数分析。以表 1 中试件 A1 和 D1 截面属性为基础,通过调整其箍筋间距,纵筋截面面积建立考虑上述参数变化的有限元模型。

表 3 给出了进行参数分析的试件表,列出了各试件的相关细节。表中试件编号的含义以 A1-382 为例说明,其中 A1 指试件所属系列,后面数字的前两位指箍筋间距为 38mm,最后一位数字指纵筋截面面积编号,编号 2 表示纵筋截面面积为编号 1 的两倍。A1 系列和 D1 系列试件的尺寸、材料力学性能、截面纵筋布置、箍筋构形分别与表 1 中相应的试件 A1 和 D1 的完全一致。对各试件均进行了五个不同平均应变率($0.00003s^{-1}$ 、 $0.0003s^{-1}$ 、 $0.003s^{-1}$ 、 $0.03s^{-1}$ 、 $0.3s^{-1}$)下的快速加载性能的模拟。参考试验测量柱轴向变形的的方式,采用柱中 270mm 高度的变形用以形成荷载-位移曲线。

表 3 参数分析试件表

Table 3 Specimens for parameter analysis

| 试件 | 箍筋间距/mm | 体积配箍率 ρ_s | 纵筋总截面面积 A_{st}/mm^2 | 纵筋配筋率 ρ_l |
|--------|---------|----------------|-----------------------|----------------|
| A1-382 | 38 | 0.0207 | 2271 | 0.0244 |
| A1-272 | 27 | 0.0291 | 2271 | 0.0122 |
| A1-762 | 76 | 0.0104 | 2271 | 0.0244 |
| A1-381 | 38 | 0.0207 | 1136 | 0.0122 |
| D1-382 | 38 | 0.0121 | 2271 | 0.0244 |
| D1-192 | 19 | 0.0242 | 2271 | 0.0244 |
| D1-381 | 38 | 0.0121 | 1136 | 0.0122 |

从图 4 的分析结果可以看出,快速加载与准静载的力-位移曲线的上升段刚度基本一致,承载力随应变率的提高而提高,在应变率达到 $0.3s^{-1}$ 时,承载力的提高最大达到 29%。并且下降段随应变率的

提高而变陡，延性降低。

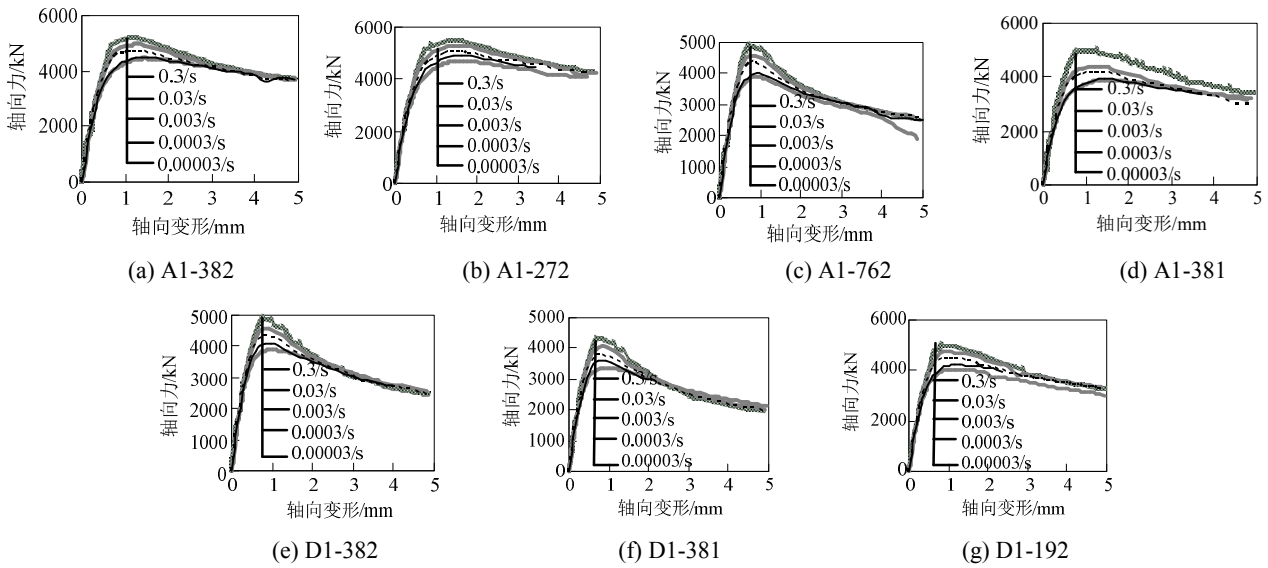


图4 参数对荷载-变形曲线影响

Fig.4 Influence of parameters on load versus deformation curves

图5反映了各分析参数对承载力动力增大系数(DIF)影响。从图5可以看出体积配箍率对DIF的影响。比较图5(a)中A1-382与A1-762的DIF随应变率变化曲线，表明箍筋间距的增大引起体积配箍率的减少使得DIF值增大，并且应变率越高，DIF值增大得越多。比较图5(a)和图5(b)中A1-382与D1-382，A1-381与D1-381，比较对象仅有的差别在于箍筋的构形不一样引起的体积配箍率不一样，A1系列体积配箍率比D1系列体积配箍率高，从图中可见相同应变率下比较组的D1系列的DIF比A1系列的要大。比较图5(a)中的A1-382与A1-272和图5(b)中的D1-382与D1-192，则发现箍筋间距的变化对DIF的值影响很小。由此可见，体积配箍率是影响钢筋混凝土柱率敏感性的重要参数。在体积配箍率相对较大的情况下，随其值增大，柱率敏感性降低。当体积配箍率达到一定值时，体积配箍率的提高对约束钢筋混凝土轴压短柱的率敏感性的改变影响很少。

比较图5(a)中A1-382与A1-381，表明在应变率小于 $0.03s^{-1}$ 时，纵筋配筋率的减少对DIF的影响较少，但当应变率在 $0.3s^{-1}$ 时纵筋配筋率减少一半导致了DIF陡增，DIF值大约提高了1.1倍。比较图5(b)中D1-382与D1-381，纵筋配筋率减少一半使DIF增大值随应变率增大而增大。图5(a)和图5(b)中出现纵筋配筋率变化对DIF的影响效果不一致是源于两试件箍筋配置的差别，尽管箍筋间距一样，

但A1系列试件为复合配箍，而D1系列试件为普通箍筋。因此纵筋配筋率对考虑应变率效应时约束钢筋混凝土短柱的性能的影响程度还与箍筋构形有关。因此文献[24]采用简化的模型分析得出纵筋配筋率对约束混凝土短柱的率敏感性无影响的结论值得商榷。

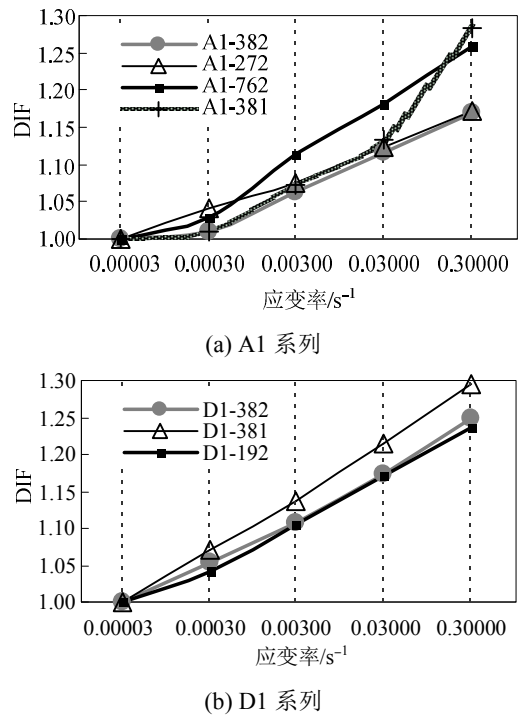


图5 各参数对承载力动力增大系数(DIF)影响

Fig.5 Influence of parameters on dynamic increasing factor (DIF) of axial strength

4 结论

基于本文建议的考虑应变率效应和约束效应的混凝土等效受压应力-应变关系,并结合混凝土塑性模型,建立了分析考虑约束效应的钢筋混凝土轴压短柱在准静载和快速加载下力学性能的有限元模型。有限元分析结果与试验结果符合良好,验证了本文建议的混凝土等效受压应力-应变关系及有限元模型在模拟足尺大体积配箍率钢筋混凝土短柱在准静载和快速加载下的力学性能的有效性,适合于钢筋混凝土短柱在地震作用下考虑应变率效应的力学行为分析。

在经验证的有限元模型基础上,对体积配箍率(箍筋构形、箍筋间距)和纵筋配筋率对钢筋混凝土柱的率敏感性的影响进行了参数分析。分析结果表明随应变率的提高,轴压短柱的承载力明显提高,但延性降低,下降段变陡。体积配箍率(箍筋构形、箍筋间距)和纵筋配筋率均对钢筋混凝土柱的应变率敏感性有影响。当体积配箍率小于某一阈值时,体积配箍率的变化明显地影响钢筋混凝土短柱在同一应变率下的率敏感性;当体积配箍率达到某一阈值时,体积配箍率的提高对钢筋混凝土短柱在同一应变率下的率敏感性的改变不明显。纵筋配筋率对约束钢筋混凝土柱的率敏感性的影响与体积配箍率及应变率有关。

参考文献:

- [1] Soroushian P, Obaseki K. Strain rate-dependent interaction diagram for reinforced concrete section [J]. ACI Journal Proceedings, 1986, 83(1): 108—116.
- [2] Al-Haddad M S. Curvature ductility of reinforced concrete beams under low and high strain rates [J]. ACI Structural Journal, 1995, 92(5): 526—534.
- [3] 林皋, 闫东明, 肖诗云, 等. 应变速率对混凝土特性及工程结构地震响应的影响[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 1—8.
Lin Gao, Yan Dongming, Xiao Shiyun, et al. Strain rate effects on the behavior of concrete and the seismic response of concrete structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 1—8. (in Chinese)
- [4] Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990 [S]. 1993.
- [5] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates [J]. Materials and Structures, 1991, 24(6): 425—450.
- [6] Malvar L J, Ross C A. Review of strain rate effects for concrete in tension [J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(6): 735—739.
- [7] Yan D M, Lin G, Chen G D. Dynamic properties of plain concrete in triaxial stress state [J]. ACI Materials Journal, 2009, 106(1): 89—94.
- [8] 邹笃建, 刘铁军, 滕军, 等. 混凝土柱单轴动态抗压特性的应变率效应研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 145—150.
Zou Dujian, Liu Tiejun, Teng Jun, et al. The research on strain rate effect of compressive behaviour of concrete column [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 145—150. (in Chinese)
- [9] Fu H C, Erki M A, Seckin M. Review of effects of loading rate on reinforced concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(12): 3660—3679.
- [10] 李敏, 李宏男. 建筑钢筋动态试验及本构模型[J]. 土木工程学报, 2010, 43(4): 70—75.
Li Min, Li Hongnan. Dynamic test and constitutive model for reinforcing steel [J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4): 70—75. (in Chinese)
- [11] Asprone D, Frascadore R, Ludovico M D, et al. Influence of strain rate on the seismic response of RC structures [J]. Engineering Structures, 2012, 35: 29—36.
- [12] Hakuto S. Seismic performance of reinforced concrete columns with 90 degree end hooks for shear reinforcement under high speed loading [EB]. <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0116.pdf>, 2000.
- [13] Orozco G L, Ashford S A. Effects of large velocity pulses on reinforced concrete bridge columns [R]. California: University of California, Berkeley, Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2002.
- [14] Tagami J, Suzuki N, Kaneko T, et al. Dynamic loading test of reinforced concrete columns for identification of strain rate effect [C]// Proceedings of the First NEES/E-Defense Workshop on Collapse Simulation of Reinforced Concrete Building Structures. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, California, 2005: 291—304.
- [15] Ghannoum W, Saouma V, Haussmann G, et al. Experimental investigations of loading rate effects in reinforced concrete columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2012, 138(8): 1032—1041.
- [16] 许斌, 龙业平. 基于纤维模型的钢筋混凝土柱应变率效应研究[J]. 工程力学, 2011, 28(7): 103—116.
Xu Bin, Long Yeping. Study on the behavior of reinforced concrete columns with fiber model considering strain rate effect [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(7): 103—116. (in Chinese)
- [17] 王德斌, 李宏男. 应变率对钢筋混凝土柱动态特性的影响[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31(6): 67—72.
Wang Debin, Li Hongnan. Effects of strain rate on dynamic behavior of reinforced concrete column [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(6): 67—72. (in Chinese)
- [18] Reinschmidt K F, Hansen R J, Yang C Y. Dynamic tests

- of reinforced concrete columns [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1964, 61(3): 317—334.
- [19] Iwai S, Minami K, Wakabayashi M. Stability of slender reinforced concrete members subjected to static and dynamic loads [C]// *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, 1988, VIII: 901—906.
- [20] 陈肇元, 罗家谦. 钢筋混凝土轴压和偏压构件在快速变形下的性能[M]//清华大学抗震抗爆工程研究室. 科学研究报告集(第4集) 钢筋混凝土结构构件在冲击荷载下的性能. 北京: 清华大学出版社, 1986: 33—44.
Chen Zhaoyuan, Luo Jiaqian. The behavior of axial and eccentric loaded RC columns under rapid rate of deformation [M]// *Science Report Collection of Tsinghua Resisting Earthquake and Blast Loading Institute-The Characteristics of R/C Structure Member under Blast Loading*, (4). Beijing: Tsinghua University Press, 1986: 33—44. (in Chinese)
- [21] 肖诗云, 许东. 应变率效应对钢筋混凝土柱的影响[J]. *防灾减灾工程学报*, 2009, 29(6): 668—675.
Xiao Shiyun, Xu Dong. Influence of strain rates on reinforced concrete column [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2009, 29(6): 668—675. (in Chinese)
- [22] 许斌, 曾翔. 钢筋混凝土长柱快速轴心受压试验与模拟研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(4): 210—217.
Xu Bin, Zeng Xiang. Experimental study and finite element analysis on the dynamic behavior of slender RC columns under concentric compressive rapid loadings [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(4): 210—217. (in Chinese)
- [23] Scott B D, Park R, Priestley M J N. Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1982, 79(1): 13—27.
- [24] Soroushian P, Sim J. Axial behavior of reinforced concrete columns under dynamic loads [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1986, 83(6): 1018—1025.
- [25] Bing L, Park R, Tanaka. H. Constitutive behavior of high-strength concrete under dynamic loads [J]. *ACI Structural Journal*, 2000, 97(4): 619—629.
- [26] Dassault Systèmes. Abaqus analysis user's manual (6.10)[EB]. <http://abaqus.me.chalmers.se/v6.10/books/usb/default.htm>, 2010..
- [27] ACI 318-08, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary-An ACI standard [S]. 2008.
- [28] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
GB 50010-2002, Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese)
- [29] Chung H S, Yang K H, Lee Y H, et al. Strength and ductility of laterally confined concrete columns [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2002, 29(6): 820—830.
- [30] Le'geron F, Paultre P. Uniaxial confinement model for normal- and high-strength concrete columns [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(2): 241—252.
- [31] 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.
- [32] Moehle J P, Cavanagh T. Confinement effectiveness of crossties in RC [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1985, 111(10): 2105—2120.
- [33] Van Doormaal J, Weerheijm J, Sluys L J. Experimental and numerical determination of the dynamic fracture energy of concrete [J]. *Journal de Physique IV*, 1994, 4(8): 501—506.
- [34] Rericha P A. Test for the rate effect on concrete fracture energy [M]. Jones N, Brebbia C A, Jones N, Manolis G D, et al. *Structures Under Shock and Impact V*. Boston: Computational Mechanics Publications in Southampton, 1998: 461—470.
- [35] Ruiz G, Zhang X X, Yu R C, et al. Effect of loading rate on fracture energy of high-strength concrete [J]. *Strain*, 2011, 47(6): 518—524.
- [36] Munoz-Garcia E, Davison B, Tyas A. Structural integrity of steel connections subjected to rapid rates of loading [DB]. <http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/40753%28171%29217>, 2005.