

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.03.020

## 拆除爆破数值模拟中钢筋混凝土构件的 建模及参数取值方法\*

孙金山<sup>1</sup>, 贾永胜<sup>1,2</sup>, 姚颖康<sup>1,2</sup>, 刘昌邦<sup>1,2</sup>, 黄小武<sup>1,2</sup>

(1. 江汉大学 爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430056; 2. 武汉爆破有限公司, 武汉 430023)

**摘要:** 采用数值模拟方法对钢筋混凝土结构的拆除爆破方案进行分析时,数值模型的简化和参数的选择对模拟结果和计算效率的影响十分显著,这影响拆除爆破数值模拟结果的可靠性。根据目前有限元法的技术水平,对钢筋混凝土构件数值模型的典型建模方法进行了评价,建议在建立大型数值模型时可忽略箍筋,但需考虑箍筋对素混凝土极限强度和应变的影响。基于拆除爆破现场试验数据,分析了楼房支撑区钢筋混凝土立柱的应变时程曲线和应变率时程曲线。实验结果显示:构件破坏过程中应变率存在强烈的波动性。数值模拟中采用应变率相关的本构模型时,应变率的强烈波动可能导致材料性能变化过于复杂,因此建议可采用应变率不相关本构模型,并根据结构破坏阶段的平均应变率对材料参数进行取值。综合考虑箍筋效应和应变率效应,提出了拆除爆破数值模拟时混凝土和钢筋的参数确定方法,以及以最大应变为主的单元失效控制方法。

**关键词:** 拆除爆破; 数值模型; 建模方法; 材料参数取值; 单元失效控制

中图分类号: TU313 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)03-0115-07

## Simplification and Parameter Selection of Reinforced Concrete Component for Numerical Simulation of Demolition Blasting

SUN Jin-shan<sup>1</sup>, JIA Yong-sheng<sup>1,2</sup>, YAO Ying-kang<sup>1,2</sup>, LIU Chang-bang<sup>1,2</sup>, HUANG Xiao-wu<sup>1,2</sup>

(1. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;  
2. Wuhan Blasting Co Ltd, Wuhan 430023, China)

**Abstract:** When the numerical simulation method is used to simulate the demolition blasting plan of reinforced concrete structure, the simplification of the numerical model and the selection of parameters have a significant effect on the simulation reliability and calculation efficiency. According to the current of finite element method, the typical modeling methods of reinforced concrete components are evaluated. It is suggested that stirrups should be neglected in the large-scale numerical model, but the influence of stirrups on the ultimate strength and strain of plain concrete should be considered. Based on the field test data of a demolition blasting project, the strain time history curve and strain rate time history curve of reinforced concrete columns in the support zone of buildings are analyzed. The results show that there is a remarkable fluctuation of strain rate in the failure process. When the strain rate dependent constitutive model is used in numerical simulation, the fluctuation of strain rate may cause the variation of material properties to be too complex. It is suggested that the strain rate independent constitutive model should be used, and the material parameters should be selected according to the average strain rate in the failure process. Considering the effect of stirrup and strain rate, the method to determine the parameters of concrete and reinforcement in the numerical simulation of demolition blasting is proposed, and the method to control the erosion of element based on the ultimate strain is proposed.

**Key words:** demolition blasting; numerical simulation; numerical modeling; material parameters; element erosion controlling

数值模拟已成为拆除爆破方案优化的重要技术手段,部分软件已基本能满足拆除爆破效果预测的要求。常用的数值模拟方法主要包括有限元法和离散元法等,其中应用最为广泛的是有限元法。在国外,针对实际拆除爆破工程的数值模拟研究成果较少公开发表,相关研究多侧重于建筑物的抗连续倒塌分析。Koji 开发了三维有限差分程序,用于分析钢筋混凝土结构爆破拆除的物理过程<sup>[1]</sup>;Feng 提出了研究高层建筑在爆炸荷载作用下响应的三维数值方法<sup>[2]</sup>;Kyei 利用 LS-DYNA 研究了横向钢筋间距对钢筋混凝土柱抗爆性能的影响<sup>[3]</sup>。近20年来,在我国城市更新和产业升级过程中拆除爆破市场巨大,行业竞争激烈,为了提高爆破工程的安全性,常采用商业软件进行拆除爆破倒塌过程的预测和分析<sup>[4-6]</sup>。

然而,由于拆除爆破工程的复杂性,数值模拟的结果与实际效果往往难以吻合。其主要原因是数值模型的简化、材料本构模型和参数的选择较为复杂,软件开发公司和科研人员未开展针对性的研究,缺乏建模和参数选取等方面的原则和依据,导致模型构建和参数选择受主观因素影响较大。这导致只有同时具备大量工程经验和计算经验的技术人员才能得到较为合理的模拟结果。

因此,建立合理的数值模型,选择合理的材料参数是拆除爆破数值模拟最重要的环节。结合研究团队的数值模拟和工程实践经验,对拆除爆破数值模拟过程中的钢筋混凝土的建模方法进行了分析和讨论。

## 1 钢筋混凝土构件的建模方式

钢筋混凝土结构主要由钢筋和混凝土材料组成。钢筋与混凝土相互协调变形,共同实现构件的承载功能,构件破坏时二者的破坏特征又表现出显著的差异性。在当前技术条件下,既要合理的简化模型减少建模的工作量,减少计算时间,又要真实模拟其受力破坏过程得到完美的模拟结果,具有较高的技术难度。而寻找数值模拟效率和效果间的平衡方案对工程实践具有重要意义。

### 1.1 典型建模方式

目前,在拆除爆破数值模拟过程中,钢筋混凝土构建有限元数值模型建模方式主要有四种:

#### 1.1.1 钢筋弥散于混凝土单元的整体式模型

整体式模型把钢筋和混凝土包含在同一个单元之中,如图1(a),即一个单元同时包含了混凝土和钢筋的特性。该模型有两种处理方式:一种是把钢筋混凝土视为连续均匀材料,单元采用混凝土-钢筋复合材料的本构关系;该方法把混凝土和钢筋对构件承载能力的贡献统一考虑,需要获得钢筋混凝土整体的应力应变关系,不适于复杂配筋构件的模拟。另一种方法是在单元中设置钢筋含量和角度等参数,并分别设置钢筋和混凝土的本构模型和参数,其适用性更好。整体式模型优势在于建模简单,计算效率高,缺陷是难以准确模拟钢筋和混凝土失效的差异性。

#### 1.1.2 钢筋与混凝土单元分离且共节点的模型

该模型常被称为分离式共节点模型,它采用不同的单元进行混凝土和钢筋的模拟。在该模型中,钢筋和混凝土之间可以插入联结单元来模拟钢筋和混凝土之间的粘结和滑移,若钢筋和混凝土之间的粘结很好,不会相对滑移,则可视为刚性粘结,如图1(b)。当粘结力超过一定的限值后,钢筋与混凝土之间可能会发生滑移。分离式共节点模型的优点是建模精细,模拟结果更可靠;缺点是建模复杂,必须进行网格的精细剖分才能建立钢筋网络。较为简化的方法是不考虑钢筋保护层,将钢筋设置在构件表面。

#### 1.1.3 钢筋与混凝土单元分离且相邻节点自由度耦合的模型

该模型常被称为分离式自由度约束模型,与分离式共节点模型相似,该模型通过相邻节点自由度的耦合将钢筋单元约束在混凝土单元中,并使其协调变形,还可以模拟混凝土和钢筋间的滑移,如图1(c)。相较于分离式共节点模型,该方法可以在实体单元中任意位置建立钢筋单元,而不必通过切割实体来获得钢筋节点,建模过程更加简便。

### 1.2 建模方式选择的建议

拆除爆破过程中炮孔内爆炸荷载仅会造成结构局部的破坏,对于结构整体的失稳倒塌过程影响较小,而拆除爆破数值模拟的主要目标是对结构失稳和倒塌过程进行预测,计算立柱爆炸荷载是不经济的。因此,应根据爆破对象特征和爆破方案选择钢筋混凝土的合理建模方式:

(1) 对于烟囱、冷却塔等薄壁结构,钢筋的作用

收稿日期:2020-04-27

作者简介:孙金山(1980-),男,副教授、博士,主要从事工程爆破方面的教学与研究,(E-mail) sun99001@126.com。

通讯作者:贾永胜(1970),男,教授、博士,主要从事工程爆破方面的教学与研究,(E-mail) 422103951@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41807265);湖北省自然科学基金面上项目(2017CFB310)

对结构失效过程影响显著,且钢筋数量不大,可采用分离式模型进行建模,并应对箍筋进行建模。

(2)对于楼房等刚度较高、体积较大的建筑结构,在爆破切口附近的支撑区和跨间剪切区等部位,钢筋的作用较为显著,这些区域应采用分离式模型建模。其它受力简单仅提供重力作用的构件可采用整体式模型建模。

(3)当楼房结构的爆破模式较为复杂时,如采

用原地坍塌和纵向逐跨坍塌等,钢筋对梁柱结构的破坏过程影响显著,因此主要的梁柱结构也应采用分离式模型,并建议采用分离式自由度约束模型以简化建模过程。

(4)采用分离式模型进行大型复杂建筑物建模时,构件的轴向受力主筋可根据实际分布形态建模,也可以进行简化归并。而箍筋由于其形态和受力特征均较复杂,一般可进行忽略。

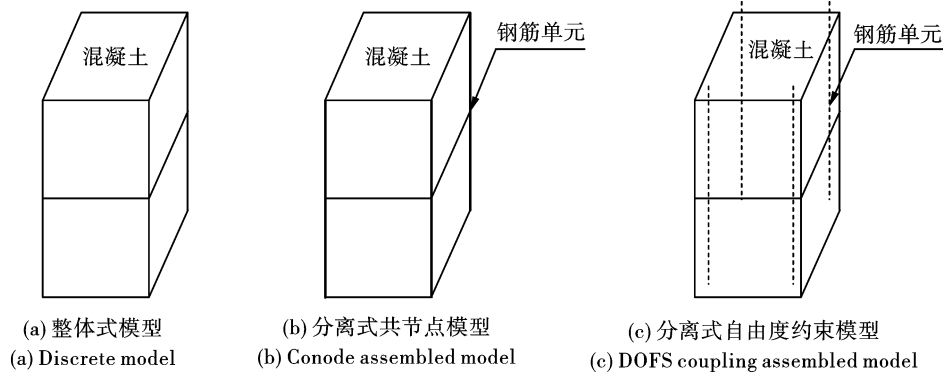


图1 典型钢筋混凝土构件建模方式

Fig. 1 Typical modeling method of reinforced concrete components

## 2 箍筋对构件参数的影响

建筑物的柱、梁和墙等矩形断面构件中,箍筋为近似封闭的矩形框。构件在截面上产生一定的横向变形时,箍筋会对核心混凝土产生约束力,使得中间的混凝土受到围压作用,构件整体的轴向承载力、延性等性能将得到提高(如图2所示),因此,在采用分离式模型进行建模时,如忽略箍筋,则必须考虑箍筋对混凝土强度的贡献。

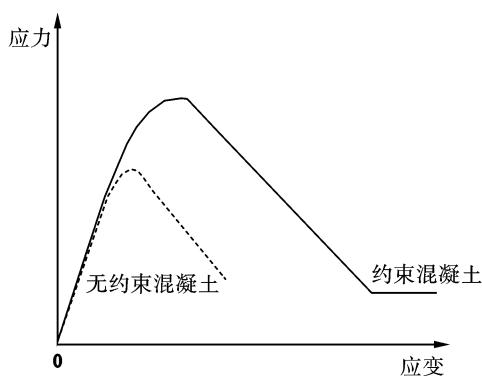


图2 约束与无约束混凝土的应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of plain concrete and confined concrete

影响箍筋约束力的因素主要包括:箍筋强度、体积配筋率、混凝土强度和配箍形式等。箍筋约束混凝土构件承载力的提高与体积配筋率和箍筋强度成

正比,与混凝土强度成反比。为反映箍筋强度、体积配筋率、混凝土强度三个因素的影响特征,我国《建筑抗震设计规范》<sup>[7]</sup>引入了配箍特征值 $\lambda_v$ 。

$$\lambda_v = \frac{f_{yv}\rho_v}{f_{co}} \quad (1)$$

式中; $f_{yv}$ 为箍筋屈服强度; $\rho_v$ 为体积配筋率; $f_{co}$ 为混凝土强度。

针对配箍形式对约束混凝土构件承载力的影响<sup>[8]</sup>,Daniel Cusson等人提出了几何有效约束系数 $k_e$ 。

$$k_e = \frac{A_c}{A_c} \quad (2)$$

式中: $A_c$ 为核心区混凝土面积; $A_c$ 为构件截面面积。

对于常见的矩形箍筋,Mander给出了 $A_c$ 计算公式<sup>[9]</sup>,薛岩通过取1.1%的最小配筋率对 $k_e$ 计算公式进行了简化<sup>[10]</sup>,对于正方形截面

$$k_e = 1.01(1 + 0.015n) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \left(1 - \frac{s}{2b}\right)^2 \quad (3)$$

式中; $n$ 为 $x$ 和 $y$ 方向单侧布置纵向钢筋肢数之和; $s$ 为箍筋纵向间距; $b$ 为方形截面边长。

对于长方形截面

$$k_e = 1.01a(1 + 0.015n) \left(1 - \frac{2}{n}\right) \left(1 - \frac{s}{2b}\right) \left(1 - \frac{s}{2c}\right) \quad (4)$$

式中:  $b$  为长方形截面长边的边长;  $c$  为短边的边长;  $a$  为折减系数, 当  $1 < b/c \leq 2$  时,  $a = 0.95$ ; 当  $2 < b/c \leq 3$  时,  $a = 0.9$ ; 当  $3 < b/c \leq 4$  时,  $a = 0.85$ 。

### (1) 压缩屈服强度

薛岩通过对 156 组箍筋约束混凝土柱轴压试验数据的统计<sup>[10]</sup>, 拟合得到了综合考虑箍筋强度、体积配筋率、混凝土强度和配箍形式四个参数的箍筋约束混凝土构件强度  $f_{cc}$  经验公式

$$f_{cc} = (1 + 2.33\lambda_v k_e) f_{co} \quad (5)$$

此外, 齐虎<sup>[11]</sup>、钱稼茹<sup>[12]</sup>、Hoshikuma<sup>[13]</sup>、Park 等也有提出了类似的经验公式<sup>[14]</sup>, 可根据实际情况选择合适的公式。

### (2) 极限压缩应变

根据强度与应变间的关系, 压缩屈服时箍筋约束混凝土的峰值应变为<sup>[10]</sup>

$$\varepsilon_{cc} = (1 + 9.6\lambda_v k_e) \varepsilon_{co} \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon_{co}$  为素混凝土极限压缩应变。

根据薛岩提出的约束混凝土本构模型<sup>[10]</sup>, 峰后应力达到  $50\%f_{cc}$  和  $20\%f_{cc}$  时的应变  $\varepsilon_{50}$ 、 $\varepsilon_{20}$  为

$$\varepsilon_{50} = \varepsilon_{cc} + \frac{f_{cc}}{44f_{co}} (\lambda_v k_e)^{0.6} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{20} = \varepsilon_{cc} + \frac{2f_{cc}}{55f_{co}} (\lambda_v k_e)^{0.6} \quad (8)$$

箍筋侧向约束作用对混凝土抗拉强度和极限应变同样存在一定的影响, 但其影响比对抗压强度影响弱, 因此对箍筋约束混凝土的抗拉强度和极限抗拉应变均宜采用混凝土的原始值。

## 3 应变率对材料参数的影响

钢筋和混凝土都是应变率敏感性材料, 随着应变率的增加, 材料的强度会增大, 同时脆性也会增加。拆除爆破中结构的倒塌过程是典型的动力学问题, 应考虑材料的应变率相关性。

### 3.1 应变率波动性对本构模型选择的影响

拆除爆破工程中, 在部分承载构件爆破破坏后, 结构中的应力将发生重新分布。图 3 为武汉大学工学部 1 号教学楼拆除爆破工程中, 最后一排底层立柱在失稳阶段的应变时程曲线, 在其前排立柱起爆后 170 ms 时间内, 应变迅速增大, 完成一次调整, 随后发生波动且应变继续增加。而达到最大“附加”压应变后结构可能发生了失效并加速下坐, 测点的“附加”压应变得以恢复。对应变时程曲线进行求导后得到应变率时程曲线, 如图 4 所示, 构件的应变率不断发生波动, 波动范围为  $0 \sim 4 \times 10^{-2}/s$ , 最大应变率大致在  $10^{-2}/s \sim 10^{-1}/s$  量级。

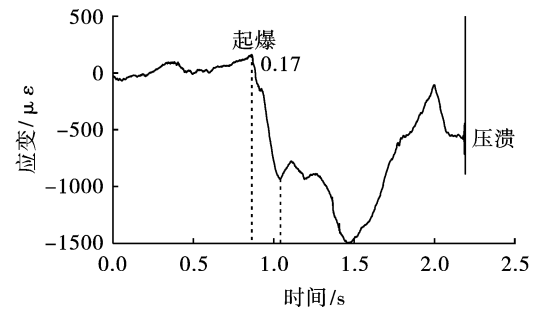


图 3 立柱混凝土应变时程曲线

Fig. 3 Strain time history curve of a concrete column

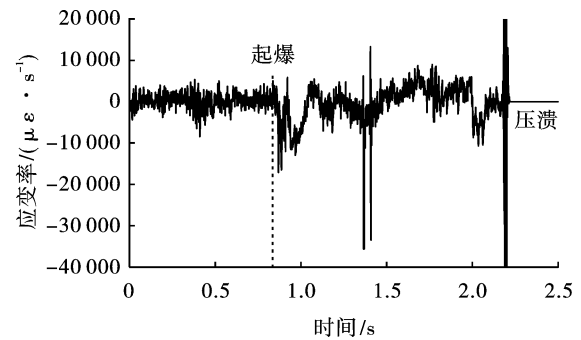


图 4 立柱混凝土应变率时程曲线

Fig. 4 Strain rate time-history curve of a concrete column

可见, 拆除爆破工程中, 构件应变率随时间的变化十分复杂, 在某一短暂时间内应变率会很高, 这与某一较长时间段内的平均应变率差别较大。而研究材料性能的动力学试验中, 大部分情况采用的实际时平均应变率, 由此提出的率相关本构模型也是基于平均应变率概念的。

因此, 拆除爆破数值模拟过程中, 构件不断波动应变率与本构模型中的应变率概念可能并不相同, 采用率相关本构模型可能会产生模拟效果失真的情况。因此, 在该问题尚未解决的情况下, 采用的率不相关本构模型可能更为合理。而采用普通本构模型时, 可以通过试算确定构件的平均应变率, 再根据平均应变率调整材料的参数, 重点保证构件在破坏阶段模拟的可靠性。

### 3.2 应变率对混凝土力学参数的影响

通常采用动载下钢筋混凝土参数特征值与静载下特征值的比值 DIF (Dynamic Increase Factor) 来表示钢筋混凝土材料动态性能的提高程度。

#### 3.2.1 抗压强度

李敏进行了 C30 和 C50 混凝土在不同加载速率下的单轴抗压强度试验<sup>[15]</sup>。C30 混凝土应变率从  $10^{-5}/s$  变为  $10^{-4}/s$ 、 $10^{-3}/s$ 、 $10^{-2}/s$  时, 平均抗压强度分别提高了 7.1%、12.6%、19.5%。C50 混凝土平均抗压强度分别提高了 3.3%、6.5%、9.2%。

欧洲国际混凝土委员会提出了不同应变率条件下的 DIF 公式<sup>[16]</sup>

$$\frac{f_{cd}}{f_{cs}} = \left( \frac{\dot{\varepsilon}_c}{\dot{\varepsilon}_{c0}} \right)^{\frac{1.026}{5+0.75 \times 10^{-6} f_{cu}}} \quad (9)$$

式中:  $f_{cd}$  为动态抗压强度;  $f_{cs}$  为静态抗压强度;  $f_{cu}$  表示准静态混凝土立方体抗压强度;  $\dot{\varepsilon}_c$  为当前应变率, 取值范围  $\dot{\varepsilon}_{c0} < \dot{\varepsilon}_c \leq 30/s$ ,  $\dot{\varepsilon}_{c0} = 3 \times 10^{-5}/s$ 。

### 3.2.2 抗拉强度

欧洲国际混凝土委员会推荐的混凝土动态抗拉强度的动力提高系数为<sup>[16]</sup>

$$\frac{f_{td}}{f_{ts}} = \left( \frac{\dot{\varepsilon}_t}{\dot{\varepsilon}_{t0}} \right)^{\frac{1.016}{10+0.5 \times 10^{-6} f_{cu}}} \quad (10)$$

式中:  $f_{td}$  为动态抗拉强度;  $f_{ts}$  为准静态抗拉强度; 应变率取值范围  $\dot{\varepsilon}_{t0} < \dot{\varepsilon}_t \leq 30/s$ ,  $\dot{\varepsilon}_{t0} = 3 \times 10^{-5}/s$  为准静态应变率。

### 3.2.3 弹性模量

应变率对混凝土弹性模量也有一定的影响, 混凝土的动态弹性模量包括压缩模量和拉伸模量, 压缩模量的应变率敏感性更高, 欧洲国际混凝土委员会给出了动弹模的计算公式<sup>[16]</sup>

$$\frac{E_{cd}}{E_c} = \left( \frac{\dot{\varepsilon}_c}{\dot{\varepsilon}_{c0}} \right)^{0.026} \quad (11)$$

$$\frac{E_{td}}{E_t} = \left( \frac{\dot{\varepsilon}_t}{\dot{\varepsilon}_{t0}} \right)^{0.016} \quad (12)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}_{c0} = 5 \times 10^{-5}/s$ ;  $\dot{\varepsilon}_{t0} = 3 \times 10^{-6}/s$ 。

### 3.2.4 极限应变

一般而言, 通过实验获得混凝土极限应变是十分困难的, 因此以往的研究者很少分析应变率对混凝土极限应变的影响。混凝土失去承载能力时的应变率与其损伤状态相关, 可以认为应变率不影响承载能力和损伤状态间的对应关系, 即动载下混凝土失去承载力的最大应变与静载下一致。

## 3.3 应变率对钢筋力学参数的影响

### 3.3.1 强度

李敏实验结果表明 HPB235、HRB335 和 HRB400 钢筋应变率从  $2.5 \times 10^{-4}/s$  变到  $2.5 \times 10^{-3}/s$ 、 $2.5 \times 10^{-2}/s$ 、 $2.5 \times 10^{-1.4}/s$  时<sup>[15]</sup>, 屈服强度分别提高了 10.5%、13.0%、22.4%, 抗拉强度分别提高了 3.7%、4.3%、4.9%。他提出钢筋强度为 235 ~ 430 MPa 时的 DIF 表达式为

$$\frac{f_{yd}}{f_{ys}} = 1.0 + (0.1709 - 3.289 \times 10^{-4} f_{ys}) \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_t}{\dot{\varepsilon}_{t0}} \right) \quad (13)$$

$$\frac{f_{ud}}{f_{us}} = 1.0 + (0.02738 - 2.982 \times 10^{-5} f_{us}) \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_s}{\dot{\varepsilon}_{s0}} \right) \quad (14)$$

欧洲国际混凝土委员会给出的热轧钢筋 DIF 表达式为<sup>[16]</sup>

$$\frac{f_{yd}}{f_{ys}} = 1.0 + \frac{6 \times 10^6}{f_{ys}} \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_s}{\dot{\varepsilon}_{s0}} \right) \quad (15)$$

$$\frac{f_{ud}}{f_{us}} = 1.0 + \frac{6 \times 10^6}{f_{us}} \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_s}{\dot{\varepsilon}_{s0}} \right) \quad (16)$$

式中:  $f_{ys}$  和  $f_{yd}$  为准静态和动态屈服强度;  $f_{us}$  和  $f_{ud}$  为准静态和动态抗拉强度;  $\dot{\varepsilon}_s$  为钢筋实际应变率;  $\dot{\varepsilon}_{s0}$  为准静态应变率;  $\dot{\varepsilon}_{s0} = 5 \times 10^{-5}/s$ 。该公式是根据屈服强度为 400 MPa 的钢筋的试验结果得到的。

### 3.3.2 弹性模量及极限应变

钢筋弹性模量与应变率有一定的相关性, 但李敏实验结果表明 HPB235、HRB335 和 HRB400 弹性模量对应变率并不敏感<sup>[15]</sup>, 因此可以近似认为其是不随应变率变化的常量。

针对钢筋破坏时的最大延伸率(钢筋拉断后的伸长变形与量测标距的比值)或称极限应变, So-roushian 曾提出钢筋的极限延伸率的计算公式<sup>[17]</sup>, 而李敏实验结果表明极限延伸率随应变率的增大而先增大后减小<sup>[15]</sup>, 应变率在  $10^{-2}/s$  量级时 HRB400 动极限延伸率总体上与静荷载下接近。因此, 也可以忽略应变率对钢筋极限延伸率的影响。

## 4 钢筋与混凝土力学参数的综合确定

研究表明<sup>[18,19]</sup>, 随着围压的增加, 混凝土的应变率效应有降低的趋势, 因此箍筋对钢筋混凝土的应变率敏感性存在一定影响。反之, 应变率对箍筋效应的发挥也存在一定的影响。目前, 此类研究较少, 箍筋和应变率的相互影响特征可予以忽略。

因此, 采用钢筋混凝土的整体式或分离式模型, 不进行箍筋单元的建模时, 综合考虑应变率效应和箍筋效应, 钢筋混凝土的参数可采用如表 1 和表 2 所列的公式进行计算。

## 5 构件单元失效删除的控制

钢筋混凝土单元在受到拉伸、压缩、剪切等作用时将发生开裂、屈服, 但其仍具有一定的残余承载力, 即“屈服”不等同“失效”。当其完全破坏为散体时才完全失去承载能力, 即失效。采用一般的有限元法进行数值模拟时, 为了克服有限元法的缺陷, 模拟钢筋混凝土的破坏时, 需将一些失效和接近失效的单元进行删除, 以使数值模拟结果与真实的压溃、剪断等现象相似。

失效单元的删除控制对模拟结果存在显著的影

响。对钢筋而言,虽然其抗压强度相近,但仅在拉伸状态下才能发生真正的断裂现象,在压缩作用下钢筋可发生屈服但不存在压缩断裂的情况。对混凝土而言,在发生拉伸断裂后再进行压缩时可能仍具有基本完整的压缩承载力。因此,如简单地在单元达到极限强度或极限应变时将其删除,可导致模拟的误差。

表 1 忽略箍筋时混凝土参数计算方法  
Table 1 Calculation formula for concrete parameters ignoring stirrup

主要参数	计算方法(国际单位制)
抗压强度	$f_{cc} = f_{co} (1 + 2.33 \lambda_v k_e) \left( \frac{\dot{\varepsilon}_c}{\dot{\varepsilon}_{c0}} \right)^{5 + \frac{1.026}{0.75 \times 10^{-6} f_{cu}}}$
抗拉强度	$f_{tc} = f_{to} \left( \frac{\dot{\varepsilon}_t}{\dot{\varepsilon}_{t0}} \right)^{\frac{1.016}{10 + 0.5 \times 10^{-6} f_{cu}}}$
压溃失效应变	$\varepsilon_{50} = \varepsilon_{cc} + \frac{f_{cc}}{44 f_{co}} (\lambda_v k_e)^{0.6}$
	$\varepsilon_{20} = \varepsilon_{cc} + \frac{2 f_{cc}}{55 f_{co}} (\lambda_v k_e)^{0.6}$
	$\varepsilon_{cc} = (1 + 9.6 \lambda_v k_e)$ 方形截面: $k_e = 1.01 (1 + 0.015n) \left( 1 - \frac{2}{n} \right) \left( 1 - \frac{s}{2b} \right)^2$ 长方形截面: $k_e = 1.01 \alpha (1 + 0.015n) \left( 1 - \frac{2}{n} \right) \left( 1 - \frac{s}{2b} \right) \left( 1 - \frac{s}{2c} \right)$
拉裂失效应变	$\varepsilon_{tcu} = \varepsilon_{tu}$
弹性模量	$E_{cd} = E_c \left( \frac{\dot{\varepsilon}_c}{\dot{\varepsilon}_{c0}} \right)^{0.026}$
	$E_{td} = E_t \left( \frac{\dot{\varepsilon}_t}{\dot{\varepsilon}_{t0}} \right)^{0.016}$

注:式中  $\dot{\varepsilon}_{c0} = 5 \times 10^{-5} / s$ ;  $\dot{\varepsilon}_{t0} = 3 \times 10^{-6} / s$ 。

表 2 受力主筋力学参数计算公式  
Table 2 Calculation formula for parameters of steel bars

主要参数	计算方法(国际单位制)
屈服强度	$f_{yd} = f_{ys} \left[ 1.0 + \frac{6 \times 10^6}{f_{ys}} \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_s}{\dot{\varepsilon}_{s0}} \right) \right]$
峰值强度	$f_{ud} = f_{us} \left[ 1.0 + \frac{6 \times 10^6}{f_{us}} \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}_s}{\dot{\varepsilon}_{s0}} \right) \right]$
失效应变	$\varepsilon_{su} = \varepsilon_{s0}$
弹性模量	$E_{sd} = E_{s0}$

注:式中  $\dot{\varepsilon}_{s0} = 5 \times 10^{-5} / s$ 。

另外,动力学数值模拟为了控制系统的能量,必须在计算过程中加入阻尼,而材料阻尼的存在使应力和应变峰值并不同步,应变滞后于应力,而应变对材料失效的影响大于应力。

因此,考虑钢筋和混凝土材料的特征以及二者的协调作用,建议通过设置极限应变阈值来控制材料的失效删除,即超过设定的应变变量后单元才被删除。其中,受拉和受压钢筋的失效应变变量可取极限拉应变。拉伸混凝土的失效应变变量可取钢筋的屈服应变,因为钢筋未屈服时拉裂混凝土在荷载消失后仍可基本恢复原状,并不会发生形态强烈改变,但需将其残余拉伸强度设为很低的值。压缩混凝土的失效应变可取箍筋约束构件宏观极限压缩应变。

## 6 结论

计算机数值仿真技术是优化拆除爆破方案,提高工程安全性的重要手段。然而,数值模型的构建和材料参数的选择显著影响数值模拟结果的可靠性。结合部分工程的数值模拟经验,讨论了结构失稳倒塌模拟过程中钢筋混凝土构件的建模方式和材料参数选择的基本原则及方法。

(1) 对于薄壁结构宜采用钢筋——混凝土分离式模型,并对箍筋进行建模;大型建筑的支撑区、跨间剪切区、压溃区等应力集中区域钢筋作用显著,宜采用分离式自由度约束模型。

(2) 采用分离式模型进行钢筋混凝土构件简化建模时,轴向受力主筋可根据实际形态建模,也可以进行简化归并,而箍筋一般可忽略。

(3) 钢筋混凝土构件箍筋的约束作用和应变率效应会使混凝土参数发生改变,参数取值时应予以考虑,且可通过配箍特征值  $\lambda_v$ , 强度动态增强系数 DIF 综合确定。

(4) 通过单元的应变阈值来控制其失效删除,钢筋的失效应变可取极限拉应变,拉伸混凝土的失效应变可取钢筋的屈服应变,压缩混凝土的失效应变可取箍筋约束构件宏观极限压缩应变。

## 参考文献 (References)

- [1] KOJI Uenishi, HIROSHI Takahashi, HIROSHI Yamachi, et al. PC-based simulations of blasting demolition of RC structures[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24: 2401-2410.

- [2] FENG Fu. Dynamic response and robustness of tall buildings under blast loading [J]. Journal of Constructional Steel Research 2013, 80:299-307.
- [3] CONRAD Kyei, ABASS Braimah. Effects of transverse reinforcement spacing on the response of reinforced concrete columns subjected to blast loading[J]. Engineering Structures, 2017, 142:148-164.
- [4] 陈宝心. ANSYS 模拟框架结构楼房逐段解体爆破拆除 [J]. 爆破, 2004, 21(3):5-7, 20.
- [4] CHEN Bao-xin. ANSYS simulation of the blasting process by gradual disintegration[J]. Blasting, 2004, 21(3):5-7, 20. (in Chinese)
- [5] 贾永胜, 谢先启, 李欣宇, 等. 建(构)筑物控制爆破拆除的仿真模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1):285-288.
- [5] JIA Yong-sheng, XIE Xian-qi, LI Xin-yu, et al. Numerical simulation for demolition of structures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1):285-288. (in Chinese)
- [6] 蒙云琪, 倪明亮, 操鹏, 等. 基于数值模拟的铁四院前大楼拆除爆破方案优化[J]. 爆破, 2018, 35(1):96-103.
- [6] MENG Yun-qi, NI Ming-liang, CAO Peng, et al. Optimization of demolition blasting scheme of Tie Si Yuan former building based on Numerical Simulation [J]. Blasting, 2018, 35(1):96-103. (in Chinese)
- [7] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [8] DANIEL Cusson, PATRICK Paultre. Stress-strain model for confined high-strength concrete[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3):468-477.
- [9] MANDER J B, PRIESTLY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1988, 114(8):1804-1826.
- [10] 薛岩. 钢筋混凝土柱箍筋约束性能及延性研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学硕士论文, 2015.
- [10] XUE Yan. Study on confinement behavior and ductility of stirrups in reinforced concrete columns[D]. Xian: Master thesis, Xian University of Architecture and Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 齐虎, 李云贵, 吕西林. 箍筋约束混凝土的单轴力学性能研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(1):79-82.
- [11] QI Hu, LI Yung-ui, LU Xi-lin. Uniaxial mechanical properties of concrete confined by stirrups[J]. Architectural structure, 2011, 41(1):79-82. (in Chinese)
- [12] 钱稼茹, 程丽荣, 周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(10):1369-1373.
- [12] QIAN Jia-ru, CHENG Li-rong, ZHOU Dong-liang. Central compressive behavior of concrete columns constrained by ordinary stirrups[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2002, 42(10):1369-1373. (in Chinese)
- [13] J Hoshikuma, K Kawashima, K Nayaga, et al. Stress-strain model for confined RC in bridge piers[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 123(5):625-633.
- [14] R Park, M J N Priestley, W D Gill. Ductility of square-confined concrete columns [J]. Proceedings, ASCE, 1982, 108(4):929-950.
- [15] 李敏. 材料的率相关性对钢筋混凝土结构动力性能的影响 [D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2011.
- [15] LI Min. Effect of material rate dependence on dynamic performance of reinforced concrete structures [D]. Dalian: Doctor thesis, Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [16] Comité Euro-International du Béton CEB-FIP model code 1990 [S]. Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire, UK, 1993.
- [17] SOROUSHAN P, CHOI K B. Steel mechanical properties at different strain rates[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(4):663-672.
- [18] K Fujikake, K Mori, K Uebayashi. Dynamic properties of concrete materials with high rates of tri-axial compressive loads [J]. Structures and Materials, 2000, 8:511-522.
- [19] 闫东明. 混凝土动态力学性能试验与理论研究 [D]. 大连: 大连理工大学博士学位论文, 2006.
- [19] YAN Dong-ming. Experimental and theoretical study on dynamic mechanical properties of concrete [D]. Dalian: Doctor thesis, Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)