

建筑科学

ABAQUS显式分析方法在 钢筋混凝土结构中的应用

王素裹¹ 韩小雷^{1,2*} 季静^{1,2}

(华南理工大学 土木与交通学院¹, 广州 510640; 亚热带建筑科学国家重点实验室², 广州 510640)

摘要 为了考察 ABAQUS 显式分析方法在钢筋混凝土结构上应用的适用性和准确性, 用显式与隐式两种分析方法对迭代算法和求解时间进行了对比, 并且对钢筋混凝土悬臂梁分别进行了隐式和显式模拟分析。用结果曲线详细地对比可知, 显式分析方法能够在解决材料失效和破坏导致的收敛问题的基础上, 较为准确地模拟钢筋混凝土结构响应。最后, 给出了采用显式分析参数定义时的注意事项及判定分析结果稳定性的方法。

关键词 显式分析 隐式分析 钢筋混凝土结构 非线性 结果稳定性

中图分类号 TU375; 文献标志码 A

ABAQUS 主要有两种求解模块: ABAQUS/Standard 和 ABAQUS/Explicit, 这两种模块均可进行非线性分析模拟。ABAQUS/Explicit 是 ABAQUS/Standard 的一个子集, 利用对时间的显式积分求解动态有限元方程, 适合于分析冲击、爆炸等短暂瞬时的动态事件, 对高度非线性问题也非常有效, 如模拟加工成型过程中改变接触条件的问题^[1]。合理选取求解模块有利于快速而精确地实现非线性有限元的模拟, 达到计算机仿真模拟的目的。

对于钢筋混凝土这一复合材料, 由于混凝土抗拉强度较低, 而混凝土的开裂常导致有限元分析模拟中结构负刚度的出现, 此时若采用隐式分析方法进行求解, 将产生严重的收敛困难、大大增加计算成本和计算时间。因此, 在保证结果正确性的情况下, 可考虑采用显式分析方法来进行求解。本文通过对隐式求解和显式求解这两种分析方法在理论

计算方法上的对比和钢筋混凝土悬臂梁分析模拟结果的对比, 研究了显式分析方法在钢筋混凝土结构中的适用性和准确性, 并给出了保证显式分析结果稳定性和正确性的参数定义要点和判断方法。

1 显式分析与隐式分析理论对比

1.1 迭代算法

对于显式和隐式两个时间积分过程, 平衡是以外力、单元内力和节点加速度的形式定义的。为了确定单元内力, 两种算法都求解节点加速度, 区别在于计算节点加速度的方式。

1.1.1 显式算法基于动力学方程, 无需迭代

动态显式算法采用动力学方程的时间差分格式, 不用直接求解切线刚度, 不需要进行平衡迭代, 计算速度快, 时间步长只要取得足够小, 一般不存在收敛问题。因此, 需要的内存也比隐式算法要少。但显式算法要求质量矩阵为对角矩阵, 而且只有在单元级计算尽可能少时速度优势才能发挥, 往往采用减缩积分方法, 因而该求解算法容易激发沙漏模式、影响应力和应变的计算精度。

ABAQUS 中采用的显式算法是中心差分法, 计

2009年4月29日收到 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点
实验室开放基金项目(2008KA01)资助

第一作者简介: 王素裹(1984—), 女, 博士研究生, 研究方向: 钢筋混凝土结构抗震性能, E-mail: wangsguo@foxmail.com.

*通信作者简介: 韩小雷(1964—), 男, 教授, 博导, 研究方向: 复杂结构的抗震, E-mail: xlhan@scut.edu.cn.

算公式如下式所示^[11]:

$$\dot{u}|_{t+\frac{\Delta t}{2}} = \dot{u}|_{t-\frac{\Delta t}{2}} + \left[\frac{d|_{t+\frac{\Delta t}{2}} + d|_{t-\frac{\Delta t}{2}}}{2} \cdot \dot{u} \right]_{(t)} \quad (1)$$

该算法不需要进行迭代求解,平衡方程仅在率形式上得到满足,得到的结果误差会被积累、慢慢偏离正确值。因此,为了减少误差、保证结果的精确度、防止在显式动力求解过程中容易导致数值计算的不稳定和分叉,必须每步使用很小的时间增量。这意味着显式分析的时间步较多而步长较小,由于不要求解联立方程,所以每个时间增量需要的计算成本较低。

1.1.2 静态隐式算法基于虚功原理,一般需要迭代计算

ABAQUS中的隐式算法采用 Newton-Raphson 算法进行非线性问题求解^[2,3]。在隐式算法中的增量步取值可以比显式算法大很多,但在实际运算中受到迭代次数及非线性程度的限制,过大的增量步会导致收敛问题的出现,因而应该取一个合理值。该算法为了改进求解结果,在每个增量步都要进行一次或多次矩阵求解,都需要对静态平衡方程进行迭代求解,每次迭代都需要求解联立方程组,这一过程需要占用相当数量的计算资源、磁盘空间和内存。另外,在隐式非线性分析中,每个时间步内都有可能会出现非线性,这与其中大规模方程的频繁求解一起增加了隐式求解的复杂性和计算费用。

1.2 求解时间

基于各自迭代算法的特点,显式分析和隐式分析所需的求解时间对比如下:

显式分析的计算成本消耗与单元数量成正比,并且大致与最小单元的尺寸成反比;经验表明,隐式分析对于许多问题的计算成本大致与自由度数

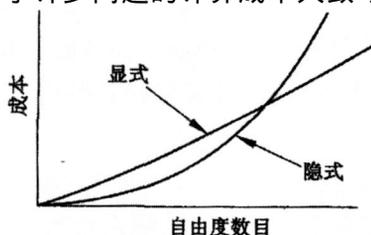


图1 隐式和显式方法中耗费成本-模型尺寸图

目的平方成正比^[4]。因此,如果网格是相对均匀的,随着模型尺寸的增长,显式分析比隐式分析更加能节省计算成本,两者的成本耗费对比如图1所示^[11]。

2 算例分析

2.1 模型概况

钢筋混凝土悬臂梁跨长 2.5 m,截面尺寸为 200 mm × 500 mm,在悬臂端承受竖向荷载 P 的作用,如图2所示,详细的截面配筋情况如图3所示。

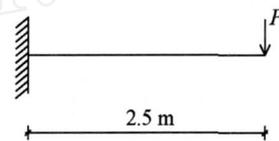


图2 钢筋混凝土悬臂梁

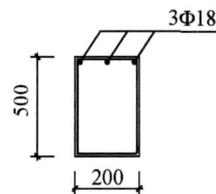


图3 截面配筋

2.2 分析模型及计算参数

模型中的混凝土弹性模量取为 3.0×10^4 MPa,泊松比取为 0.167,单轴抗压强度取为 20.1 MPa,单轴抗拉强度取为 2.1 MPa,详细的单轴受压、受拉数据采用混凝土结构设计规范^[5]建议的公式进行计算。

ABAQUS中自带描述混凝土材料的本构模型共有三种:弥散模型、开裂模型和损伤塑性模型^[6]。其中,弥散模型和损伤塑性模型可用于隐式分析、开裂模型和损伤塑性模型可用于显式分析。为了方便进行隐式和显式分析结果之间的对比,本算例的混凝土本构模型采用两者均适用的损伤塑性模型,该模型能够模拟混凝土在各种荷载类型下的拉伸开裂和压缩破碎形态,并且可以考虑拉压损伤,在这一方面损伤塑性模型优于弥散模型。

在弹塑性分析中,混凝土单元类型采用八节点减缩积分实体单元 C3D8R。采用该单元对位移的求解结果较精确,在网格发生扭曲变形时分析精度不会受到大的影响,并且在弯曲荷载下不容易发生剪切自锁^[7]。

钢筋采用描述弹塑性的双斜线数学模型,材料力学性能参数见表 1。单元类型采用三维桁架线性单元 T3D2。

钢筋与混凝土之间的相互关系通过 * EMBEDDED ELEMENT命令进行模拟,即将钢筋嵌入到混凝土的实体单元中,两者之间的粘结滑移关系在混凝土本构中通过 * TENS DN STIFFEN NG进行模拟。

表 1 钢筋力学性能指标

	弹性模量 MPa	泊松比	屈服强度 MPa	屈服应变	极限强度 MPa	极限强度对应的应变
受力筋	2.0×10^5	0.3	335	0.002	400	0.01
箍筋	2.0×10^5	0.3	235	0.002	300	0.01

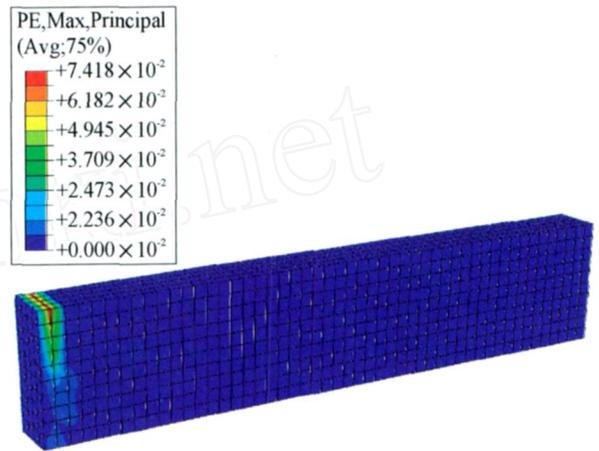
2.3 分析结果

2.3.1 荷载位移曲线对比

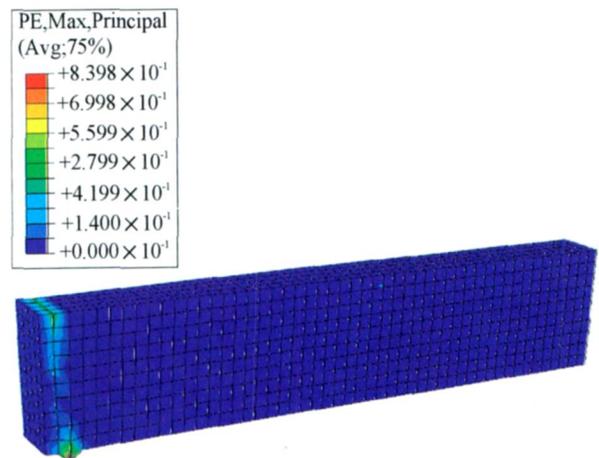
为了进行显式和隐式分析结果之间的比较,针对该算例分别采用了显式分析和隐式分析两种方法进行模拟:隐式分析中,采用 Riks分析步,并通过位移加载;显式分析中,采用 Dynamic, Explicit分析步。在显式分析中,与隐式分析不同的是:在 Time Period中定义的时间为真实的时间,该项参数由分析过程中对结构的加载速度直接决定,加载速度快则该参数取值小。梁的响应随着加载速度的变化而变化,过大的加载速度会导致梁呈现高度局部化、只发生局部变形,要使得模拟结果呈现为结构变形而非局部变形,则应取 Time Period中所取的时间大于结构最低模态周期的 10倍^[11]。为了考察显式分析中加载速度对计算结果的影响,采用了三种加载速度对算例进行加载:0.05 mm/s、0.025 mm/s、0.01 mm/s。

分析最终得到的悬臂端位移为 270 mm。损伤塑性模型通过图示方法显式裂纹方向^[8],裂纹面的法向矢量与最大主塑性应变方向平行,在 Visualiza-

tion模块中给出加载速度为 0.05 mm/s在位移为 34 mm和 270 mm时对应的最大主塑性应变分布,如图 4所示。由图可知,当位移为 34 mm时,该悬臂梁悬臂端上部受拉位置的混凝土已经发生开裂;当位移加至 270 mm时,悬臂端下部混凝土被压碎,混凝土单元发生严重变形。



(a) 加载位移为34 mm



(b) 加载位移为270 mm

图 4 最大主塑性应变分布图

根据不同模拟方法得到的荷载曲线对比如图 5所示,从图中可以看出,采用隐式分析得到的结果曲线较显式分析得到的结果曲线平滑,这说明隐式分析较显式分析稳定。另外,通过对显式分析中采用不同荷载施加速度得到的结果曲线对比可知,加载速度为 0.01 mm/s得到的结果曲线较加载速度为 0.025 mm/s和 0.05 mm/s得到的结果曲线平

滑,也更接近于隐式分析得到的结果曲线,由此证明,减小加载速度能增加模型结果曲线的平滑性。

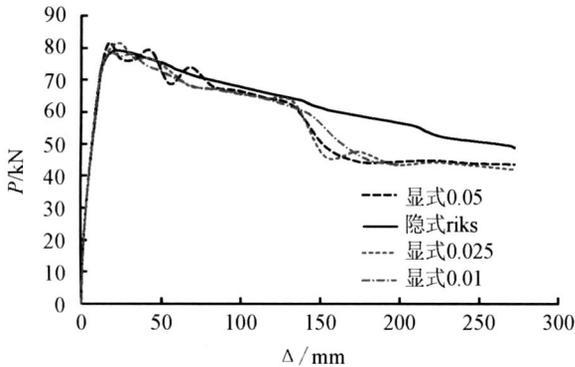


图5 荷载-位移曲线

2.3.2 显式分析结果稳定性判断

显式分析最明显的特点是基于动力学方程、不需要求解隐式分析中所需要的整体切线刚度矩阵,因此不需要迭代和收敛准则。该特点使显式分析方法在计算成本上较隐式分析方法有了显著的减小,但相比于隐式分析方法的无条件稳定,也使得显式分析方法表现为条件稳定,因此,为了避免出现数值不稳定现象,分析过程中时间增量的定义必须限制在稳定极限 t_{stable} 内,稳定极限确定方法如下^[11]:

$$t_{stable} = \frac{2}{\omega_{max}} \quad (\text{无阻尼}) \quad (2)$$

$$t_{stable} = \frac{2}{\omega_{max}} \left(\sqrt{1 + \zeta^2} - \zeta \right) \quad (\text{有阻尼}) \quad (3)$$

其中, ω_{max} 为模型最高频率; ζ 为具有最高频率的模型临界阻尼比。

针对条件稳定的特点,在得到显式分析结果后,需要对得到的计算结果进行稳定性判断。对模型在分析过程中随时间增量的各种能量历史进行对比,对判断解答所得的数值稳定性具有简单而明确的意义:一个恒定的能量平衡表明得到的求解结果是可靠的、稳定的;相反,一个明显的非恒定能量平衡则表明得到的求解结果是不可靠的、不稳定的。模型的能量平衡如下式表示^[11]:

$$E_1 + E_V + E_{FD} + E_{KE} - E_W = E_{total} = \text{constant} \quad (4)$$

(4)式中, E_1 为内能; E_V 为黏性耗散能; E_{FD} 为

摩擦耗散能; E_{KE} 为动能; E_W 为外荷载所做的功; E_{total} 为前面所述的能量的总和,它必须保持常数。

对于准静态问题,外力所做的功应近似等于系统的内能;若没有采用黏弹性材料、阻尼器或材料阻尼,则黏性耗散能一般很小;因为模型中材料的速度很小,因此在准静态分析中的惯性力可以忽略,则模型的动能应很小,一般为内能的5%~10%。

针对本算例加载速度为0.05 mm/s情况,在Visualization模块中,从History Output中提取模型随着增量步变化的能量曲线,如图6所示。图中,ETOTAL表示能量总和;ALLWK表示外力所做的功;ALLKE表示动能;ALLIE表示内能。

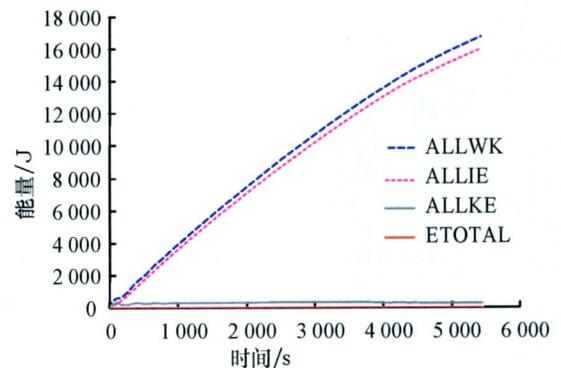


图6 能量对比图

通过图中给出的各种能量对比调查动能、内能、总能和外功情况:能量总和 E_{total} 始终保持为0;动能恒定保持在一个近似为0的值上,动能和内能相差很大(小于1%);外力所做的功近似等于系统的内能。由此可知在本模拟过程中,各个参数设置合理、能力平衡关系得以满足、分析结果稳定可靠。

3 结论

由理论分析及算例验证可知,ABAQUS显式分析方法能够在解决材料失效和破坏导致的收敛问题的基础上较为准确地模拟钢筋混凝土结构响应。该模拟方法能够减轻因负刚度而出现收敛困难、减小计算机计算成本、缩短计算时间。

通过对钢筋混凝土悬臂梁的隐式和显式分析结果对比可知,采用ABAQUS显式分析方法进行钢

筋混凝土结构模拟时,应正确设置参数定义,如加载速度、加载时间等。由于 ABAQUS显式分析方法进行结构分析时,只能进行迭代结果的稳定性自检、而不能进行收敛性自检,若参数设置不恰当,得到的结果曲线将偏离精确值或发生振荡,因此,需要对模拟结果进行稳定性、合理性判断。判断方法可以通过各种能量之间的对比来进行,对于静态问题,动能与总能之间的比应该趋向于 0,外力所做的功应近似等于系统的内能。

参 考 文 献

- 1 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, NC. Abaqus/Explicit有限元软件入门指南. 庄 茁,等译. 北京:清华大学出版社,1999
- 2 Hibbitt, karlsson & sorensen, Nc 庄 茁,等. Abaqus/Standard有限元软件入门指南. 北京:清华大学出版社,1998
- 3 庄 茁,张 帆,由小川. Abaqus非线性有限元分析与实例. 北京:科学出版社,2005
- 4 Abaqus有限元软件 6.4版入门指南. 庄 茁. 北京:清华大学出版社,1999
- 5 GB50010 - 2002,混凝土结构设计规范. 北京:中国建筑工业出版社,2002
- 6 Abaqus Inc. Abaqus User Manual, Version 6.7. 2007
- 7 石亦平,周玉容. Abaqus有限元分析实例详解. 北京:机械工业出版社,2006
- 8 王金昌,陈页开. Abaqus在土木工程中的应用. 杭州:浙江大学出版社,2006

Application of ABAQUS/Explicit in Reinforced Concrete Structures

WANG Su-guo¹, HAN Xiao-lei^{1, 2}, JI Jing^{1, 2}

(School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology¹, Guangzhou 510640, P. R. China;
State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology², Guangzhou 510640, P. R. China)

[Abstract] In order to verify the applicability and validity of ABAQUS/Explicit in reinforced concrete (RC) structures simulation, a comparison between ABAQUS/Explicit and ABAQUS/Standard is carried out. The comparison scope includes the iteration algorithm and computation time. Moreover, a RC cantilever is set as an example to explain the differences between these two analysis methods. It is verified by investigating on the load-deflection curve that RC structures can be simulated by ABAQUS/Explicit if the parameters are set reasonably. The different energy histories simulated by ABAQUS/Explicit are advised to estimate the stability of simulation.

[Key words] ABAQUS/Explicit ABAQUS/Standard reinforced concrete structure nonlinearity simulation stability