

• 工程结构减震与隔震 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202300685



基于全时程迭代的减震结构地震响应分析方法与 ABAQUS 二次开发

贾传果^{1,2}, 全姿宇³, 陈曦⁴, 李钰涛²

(1. 重庆大学山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045;
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 4. 重庆创筑技准建筑设计有限公司, 重庆 401121)

摘要:当计算设置有黏滞阻尼器的减震结构的地震响应时,直接积分法通常需要大量计算,等效线性法又具有一定的误差,故研究既简便又高精度的分析方法具有重要意义。本文以等效线性方法为原理,以黏滞阻尼器 Maxwell 恢复力模型为例,提出基于全时程迭代的结构地震响应分析方法,即采用一个附加等效线性阻尼器代替这一层建筑的所有阻尼器,计算其附加等效阻尼系数,通过地震作用下结构的速度响应更新附加等效阻尼系数。然后,以更新后的附加等效阻尼系数重新计算结构的速度时程,进行迭代计算直至得到符合要求的附加等效阻尼系数;采用 ABAQUS 实现全时程迭代法的计算,并进行二次开发实现自动迭代计算。最后,采用直接积分法对结果进行验证。结果表明:在 7 层框架结构算例中,全时程迭代法具有良好的收敛性,与直接积分法的顶层位移响应曲线吻合较好,计算精度较高,误差满足工程精度的要求,可靠度高,可提高分析效率;由 ABAQUS 二次开发得到的自动迭代计算方法可减少人为处理数据的繁琐,降低操作误差,能简化全时程迭代方法的计算过程,使全时程迭代方法可更广泛地应用于工程实际。

关键词:黏滞阻尼器;全时程迭代;附加等效阻尼系数;ABAQUS;二次开发

中图分类号: TU375.2

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2025)03-0051-10

在土木工程结构振动控制领域中,黏滞阻尼器是一种高效的耗能减震装置并被广泛应用于实际工程项目^[1]。通过合理的减震设计,在结构中设置黏滞阻尼器可耗散地震传递的能量,从而减小主体结构在多遇地震下的地震响应,使主体结构能保持线性的工作状态,仅局部布置的黏滞阻尼器表现出非线性状态,形成了典型的局部非线性问题^[2-3]。

黏滞阻尼器作为一种广泛应用的消能减震技术,具有构造简单、便于施工和减震机理明确等优点^[4],其恢复力计算模型在实际工程中常被简化,相关学者已提出了一系列有效的模型,如线性、非线性、Maxwell、Kevin 和 Wiechert 模型^[5-8],这些模型基于不同的假设,采用不同的公式描述黏滞阻尼器的力-位移行为。

目前,针对装有黏滞阻尼器的结构地震响应研究的方法主要分为两种:直接积分法和等效线性法。直接积分法需将黏滞阻尼器恢复力模型代入结构的运动方程,采用如 Newmark^[9]、Rosenbrock^[10-11]等算法

获得结构的地震响应,但其计算量大,稳定性受到积分步长的影响,在普通工程中不适用。等效线性方法将非线性的阻尼器转换为等效的线性阻尼器,通过等效的阻尼系数,利用时程分析方法即可求解结构的地震响应^[12]。但等效线性方法基于单自由度结构且需要假定结构的地震响应为正弦函数,而实际上地震运动是随机的,因此等效线性方法在实际工程的应用中也存在着一定的误差^[13]。贾传果等^[2]以等效线性方法为基本原理,提出全时程迭代思想,推导出多自由度结构中黏滞阻尼器的附加等效阻尼系数的计算公式,可减少等效线性方法的误差。

有限元软件在土木工程的应用日渐丰富,可帮助用户更好地分析结构响应。其中,ABAQUS 提供了若干用户子程序接口,允许使用者通过子程序编写满足具体功能的代码,扩展主程序的功能^[14-15]。罗维刚等^[16]采用 ABAQUS 自身提供的二次开发接口,研发了针对钢筋混凝土框架结构前处理的建模插件,可有效

收稿日期:2023-08-31 修回日期:2024-01-22 网络出版日期:2024-05-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51408080)

作者简介:贾传果(1980—),男,副教授。研究方向:工程抗震;建筑结构减震控制;结构检测。E-mail: jiachuanguo@cqu.edu.cn

减少重复性建模工作。高喆等^[17]使用 MATLAB 和 Python 语言针对性地输出 ABAQUS 模型中特定节点或杆件的应力应变,并运用到实际相应节点或杆件的强度分析中,证明了后处理二次开发技术的可靠性,提高了用户的工作效率。

以全时程迭代的思想与方法为基础,结合 ABAQUS 软件的功能寻找一种可避免大量复杂计算、尽可能快速收敛的地震响应分析方法,对于实际工程中黏滞阻尼器减震结构的抗震设计具有重要意义。

本文首先介绍选用的 Maxwell 黏滞阻尼器模型,然后基于全时程迭代方法,给出黏滞阻尼器减震结构的地震响应分析方法;针对 7 层黏滞阻尼器减震框架结构中的一榀框架,使用 ABAQUS 建模分析并结合 MATLAB 验证此分析方法的可靠性^[18];再使用 Python 对 ABAQUS 进行二次开发实现该计算方法的自动迭代,得到可高效计算附加等效阻尼系数的方法。

1 Maxwell 黏滞阻尼器恢复力模型

当黏滞阻尼器具有刚度特点且其力学性能与频率相关时,Maxwell 模型可更为精确地进行阻尼器恢复力计算^[19],其模型如图 1 所示。图 1 中, $u(t)$ 为阻尼器两端的相对位移, C_0 为零频率时的线性阻尼系数, K 为“无限大”频率区域内的刚度系数, $F_d(t)$ 为恢复力。

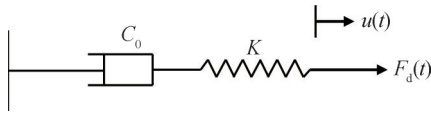


图 1 Maxwell 模型
Fig. 1 Maxwell model

Maxwell 模型中恢复力为:

$$F_d = C_d \dot{v}^a \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_1(t) + u_2(t) = u(t), \\ C_0 \dot{u}_1(t) = K u_2(t) = F_d(t) \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、(2)中, \mathbf{v} 为速度向量, \mathbf{a} 为加速度向量, C_d 为阻尼系数, $u_1(t)$ 、 $u_2(t)$ 分别为阻尼单元、弹簧单元, $\dot{u}_1(t)$ 为 $u_1(t)$ 的导数, t 为时间。

在进行非线性时程分析时,黏滞阻尼器的力学行为通常采用 Maxwell 模型进行数值模拟^[20]。当前主流有限元分析软件(包括本文采用的 ABAQUS 软件)均采用 Maxwell 模型,其优势在于能够准确地表征此类装置,且兼具刚度特性和频率依赖性的特殊力学响应。因此,在下文第 2.1 节基于全时程迭代的黏滞阻尼器减震结构地震响应分析中推导附加等效阻尼系数时均采用非线性模型中的阻尼力,其计算公式为 $F_d = C_d \dot{v}^a$ 。

2 基于 ABAQUS 全时程迭代过程二次开发

2.1 黏滞阻尼器等效线性化

本文围绕非线性黏滞阻尼器对结构地震响应的影响展开,不考虑因结构非线性滞回特性所产生的附加等效阻尼比。假设减震结构的恢复力是线性的,则黏滞阻尼器减震结构的运动方程为:

$$\mathbf{M}\mathbf{a}(t) + \mathbf{C}\mathbf{v}(t) + \mathbf{F}_d(\mathbf{v}(t)) + \mathbf{K}\mathbf{d}(t) = \mathbf{P}(t) \quad (3)$$

式中, \mathbf{M} 为减震结构的质量矩阵, \mathbf{C} 为减震结构的固有阻尼矩阵, \mathbf{F}_d 为黏滞阻尼器的非线性阻尼力向量, \mathbf{K} 为刚度矩阵, \mathbf{d} 为位移向量, \mathbf{P} 为外部激励向量。

黏滞阻尼器减震结构模型如图 2 所示。图 2 中, n 、 m 分别为平面框架的总楼层数、总跨数, θ_{ij} 为阻尼器 D_{ij} 的轴线方向与水平方向的夹角, i 、 j 分别为平面框架的楼层数、跨数。为方便求解黏滞阻尼器的非线性阻尼力向量,以图 2 的平面框架结构为例,只考虑各节点的水平移动,忽略竖向移动和转动,即只考虑水平的自由度。

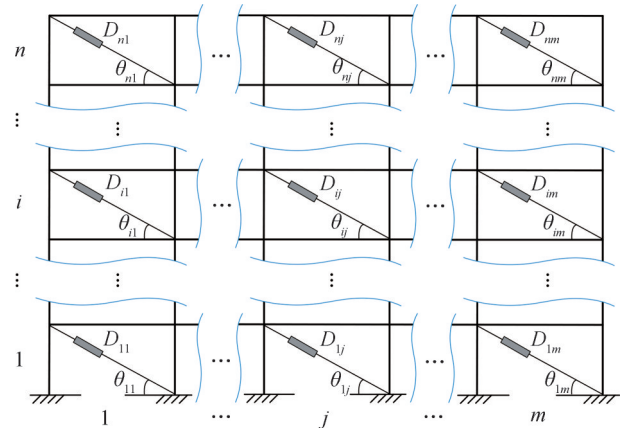


图 2 黏滞阻尼器减震结构模型

Fig. 2 Model of the structure with dampers

图 3 为黏滞阻尼器减震结构的等效模型。

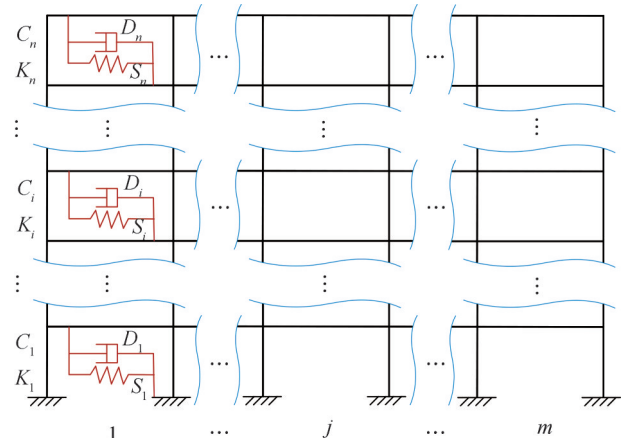


图 3 黏滞阻尼器减震结构的等效模型

Fig. 3 Equivalent model of the structure with dampers

图3中, S_i 为等效刚度。根据等效线性化方法, 结构每层均用一个水平的线性阻尼器 D_i 进行等效替换, 令 C_i 为阻尼器的等效阻尼系数, K_i 为等效刚度系数。

将式(3)进行等效线性化, 可得线性运动方程为:

$$\mathbf{M}\mathbf{a}(t) + \mathbf{C}_0\mathbf{v}(t) + \mathbf{C}_a\mathbf{v}(t) + \mathbf{K}\mathbf{d}(t) = \mathbf{P}(t) \quad (4)$$

式中, \mathbf{C}_a 为附加等效阻尼矩阵,

$$\mathbf{C}_a = \begin{bmatrix} C_1 + C_2 & -C_1 & \cdots & 0 & 0 \\ -C_1 & C_2 + C_3 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & C_{n-1} + C_n & -C_n \\ 0 & 0 & \cdots & -C_n & C_n \end{bmatrix}。$$

比较式(3)和(4), 可得两种计算方法中黏滞阻尼器阻尼力的误差为:

$$\mathbf{d} = \mathbf{F}_d(\mathbf{v}) - \mathbf{C}_a\mathbf{v} \quad (5)$$

要实现等效线性化, 需根据误差最小的原则确定等效阻尼矩阵, 为此需求解每层楼的最佳等效阻尼系数。由最小二乘法的思想可知, 当误差平方的数学期望 E 最小时, 可求得最佳的等效阻尼系数为:

$$E(\mathbf{d}^T \mathbf{d}) = E(\mathbf{F}_d^T \mathbf{F}_d + \mathbf{v}^T \mathbf{C}_a^T \mathbf{C}_a \mathbf{v} - 2\mathbf{F}_d^T \mathbf{C}_a \mathbf{v}) \doteq \min \quad (6)$$

参考文献[2]经过推导可得, 附加等效阻尼系数 C_i 为:

$$C_i = \frac{\sum_{k=1}^r \sum_{j=1}^m C_{ij} (v_i^k \sin \theta_{ij})^{1+\alpha_{ij}}}{\sum_{k=1}^r (v_i^k)^2} \quad (7)$$

式中, v_i^k 为层间相对速度, C_{ij} 为第 i 层第 j 跨非线性阻尼器的阻尼系数, $\sin \theta_{ij}$ 为非线性阻尼器的安装角度, α_{ij} 为第 i 层第 j 跨非线性阻尼器的阻尼指数, r 为积分过程总步数, k 为积分步数。

一般黏滞阻尼器的阻尼指数取值范围为 0.3~1.0, 阻尼指数越小, 结构的等效阻尼系数越大。由式(7)可知, 当其他条件相同的情况下, 减震结构的速度响应越小, 对应的附加等效阻尼系数越大。根据已有资料可知: 阻尼器的阻尼指数与阻尼系数对结构频率的影响很小, 黏滞阻尼器对结构频率的影响很小; 求得等效阻尼器与等效之前的非线性阻尼器对结构地震响应的相似。这些均为全时程迭代计算黏滞阻尼器减震结构地震响应的前提。

2.2 引入全时程迭代的等效方法

根据附加等效阻尼系数计算公式可知迭代计算过程: 首先, 假设已知每层楼的相对速度 v_i , 通过式(7)求得每层的附加等效阻尼系数 C_i , 再求得附加等效阻尼矩阵 \mathbf{C}_a ; 然后, 对等效线性化后的公式进行数值积分得到每层楼的相对速度 v_i ; 最后, 通过式(7)求得新的附加等效阻尼系数 C_i , 进入迭代计算。

虽然使用数值积分方法计算的结果较为准确, 但如果自行计算或使用 MATLAB 编程计算仍会存在计

算过程复杂、计算量大的问题。ABAQUS 中计算结构地震响应的方式即为数值积分法, 本文采用 ABAQUS 计算, 再将最后计算得到的附加等效阻尼系数与一般的数值积分方法所得结果进行对比, 验证本文方法的可行性。全时程迭代计算流程可简述为:

第1步: 按式(4)建立黏滞阻尼器减震结构运动方程, 并假设每层楼的初始附加等效阻尼系数均为 0;

第2步: 使用 ABAQUS 建立模型, 输入地震波进行作业分析, 输出减震结构的地震响应;

第3步: 根据 ABAQUS 输出的结构速度响应, 代入式(7)中计算新的附加等效阻尼系数;

第4步: 将第3步新计算的附加等效阻尼系数输入 ABAQUS 模型, 重复第2、3步, 依次迭代, 判断当连续两次迭代中减震结构地震响应最大值的差值绝对值小于允许值时, 即可停止迭代得到最终的附加等效阻尼系数。

采用全时程迭代方法的优点为: 1) 采用 ABAQUS 进行减震结构的地震响应分析, 避免使用数值积分方法的繁琐过程; 2) 比起数值积分方法的大量计算过程, 本方法仅需迭代几次即可收敛; 3) 模型采用等效线性阻尼器, 可避免非线性问题。

2.3 基于 ABAQUS 的二次开发

ABAQUS 处理分析作业经历 3 个阶段, 其中, 前处理和后处理是实现二次开发的关键阶段^[21-22]。由于实际中工程问题差异较大且偏重点不同, 通用软件无法满足用户在专业方面的需求。为解决此种情况, ABAQUS 提供了若干用户子程序接口, 允许使用者通过子程序编写能满足具体功能的代码扩展主程序的功能, 以此实现二次开发以帮助使用者提升工作效率^[23-25]。目前, 利用编程语言基于通用软件平台进行二次开发, 是各领域研究的一个重要发展方向^[26-27]。ABAQUS 通过 Python 语言提供库函数, 使用 Python 编写的函数便可在 ABAQUS 中直接进行材料特性定义、截面定义、建立模型、指派截面方向、划分网格、创建作业、提交作业、后处理分析作业等, 可避免在 ABAQUS 交互界面中手动操作, 实现自动化处理, 节省使用者大量时间, 提高分析效率^[28-30]。

2.3.1 实现过程

基于全时程迭代的方法进行计算, 需要对输出的减震结构地震响应大量数据进行提取和运算, 如果人工提取和计算, 再将计算出的附加等效阻尼系数结果重新输入 ABAQUS 的模型, 这个过程较为繁琐且无意义; 迭代运算是基于循环运算, 所以大量计算不可避免。因此, 针对完成分析的作业后处理进行二次开发非常必要。后处理主要任务包括: 提取分析作业结果

中所需节点的时程响应(速度、位移等),对提取的数据进行清洗和处理,计算每层楼的附加等效阻尼系数,改变 ABAQUS 中每层楼的阻尼器系数,创建新作业并提交分析,自动实现迭代计算。当前后两次结构响应差值的绝对值小于允许值且迭代计算次数在设定的允许次数以内时,迭代结束并输出各层楼的最大层间相对速度和附加等效阻尼系数。

结合 ABAQUS 二次开发流程,再考虑在第 2.2 节中引入全时程迭代后得到的计算流程,可整理得到此次二次开发总体操作流程,如图 4 所示。

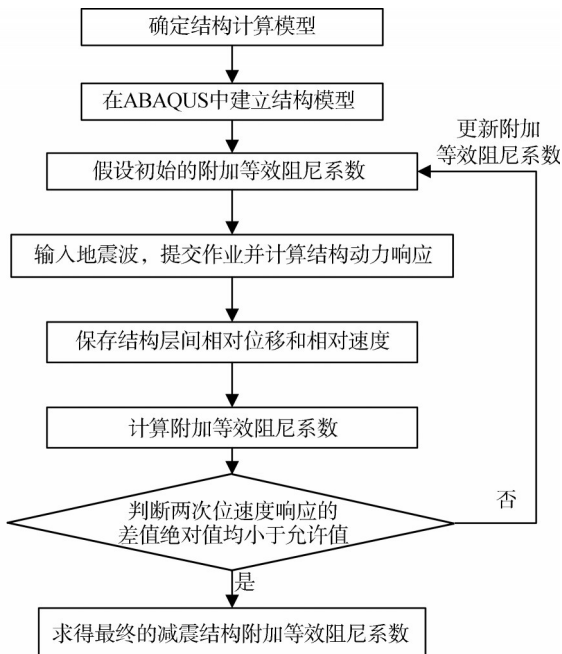


图4 ABAQUS 中总体操作流程

Fig. 4 Operation flowchart in ABAQUS

2.3.2 主要代码

1) ABAQUS 功能调用代码

图 4 中,需在第 2 步“在 ABAQUS 中建立结构模型”开始就实现输入代码后自动调用和计算。之后每一步骤涉及到 ABAQUS 中的操作都需实现自动调用相应功能。实现 ABAQUS 后处理的代码如附录 A 所示。附录表 A1 展示了部分实现调用 ABAQUS 或 CAE 中打开模型、打开输出数据库、打开模型阻尼器管理器、在阻尼器信息栏中输入阻尼系数、创建新作业并提交、打开新作业的 odb 文件,以及绘制所需节点的时程曲线并输出时程数据等功能的程序脚本,为接下来顺利进行阻尼系数计算公式的编写做好准备工作。

2) 功能函数的编写

在以上代码的基础上进行等效阻尼系数的计算,需分析的节点单元较多且每个节点的时程响应数据较多,所以在计算附加等效阻尼系数时根据数据特点

和运算流程编写相应的函数,以便提高计算效率,使整个代码更加简洁,增加可读性。以 7 层框架结构为例,解释主要函数功能。

a. getV 函数

通过读取 ABAQUS 生成的数据文件,获取减震结构 7 层相对速度,具体实现方法如下:

首先,使用 pandas 库中的 read_fwf 函数读取 ABAQUS 生成的存有减震结构 7 层顶部速度及地面运动速度的 8 个 *.rpt 文件。然后,使用 pandas 库中的 drop 系列函数清洗数据,去掉 nan、重复出现的时间点及对应的速度。接着,重新生成索引,并转换其数据类型,从 string 转换为 float。最后,求出最大速度。

b. ft_iterate 函数

先定义初始阻尼 $c_0=10^{-10}-10$,通过 getV 得到一次迭代过程中减震结构 7 层顶部的相对速度时程和最大速度。然后,计算出附加等效阻尼系数。最后,根据阻尼器的角度,计算出下一次需要输入结构的附加等效阻尼系数。

c. creatName 函数

通过输入自己自定义的部分 uniqueName 和迭代次数 c_m ,生成一系列的变量名和函数名,如: ABAQUS 作业名、生成的 odb 文件名、8 个存储速度的 rpt 文件名和绘制速度的绘图变量名称。

d. changeC 函数

通过输入要改变的模型名 detailModelName、阻尼器所在的部分的名称 changePartName、阻尼器名称 changeCName、阻尼系数具体值 c1_n、改变黏滞阻尼器的阻尼系数。

e. outPut 函数

通过输入一系列通过 creatName 生成的文件名与变量名: odbName、vv0f、vv1f、vv2f、vv3f、vv4f、vv5f、vv6f、vv7f、xyPlotName,实现打开 odb 文件,绘制需要的点、V 曲线,保存点的横纵坐标数据到 rpt 文件。

f. openModel 函数

通过输入模型名称 modelName,实现模型的打开。

g. mainProcess 函数

此函数整合了其他所有函数,是本代码的核心函数。

首先,赋值最大速度的误差为 1(即 100%),最大迭代次数为 10,调用 openModel 函数打开模型;然后,通过判断最大速度差百分比(即前后两次迭代速度差与其两者平均值的比值)是否小于设置的允许速度差百分比,迭代次数是否达到最大迭代次数,决定是否进行循环内的操作。循环内,先调用 creatName 函数

生成所需要的变量名、文件名;再调用changeC改变阻尼器的阻尼系数;接着调用submitWork提交作业并进行计算;计算完成后调用outPut获取需要的数据并保存结果;再调用ft_iterate函数,在这个过程中,调用getV函数获取减震结构各层相对速度,计算非线性恢复力和新的附加等效阻尼系数,迭代次数+1,计算最大的速度差百分比,并打印相关参数的值。当前述循环结束后,判断迭代次数是否达到最大迭代次数,并输出有关信息。

附录附录表A2汇总了部分编写的函数及其说明。

根据编写好的函数,用mainProcess函数调用计算所需的所有函数。图5为函数运算流程图。

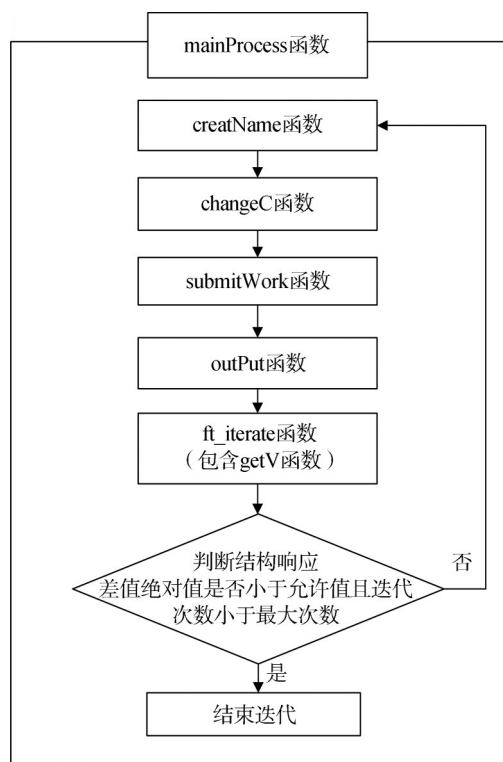


图5 函数运算流程图
Fig. 5 Function operation flow chart

3 案例分析

为验证本文提出的ABAQUS二次开发的可靠性,选取叶正强等^[18]研究的结构实例作计算模型。此模型为黏滞阻尼器减震的钢筋混凝土框架结构,在验证计算中选取其中一榀框架进行相应的地震响应分析。平面框架及阻尼器布置如图6所示。图6中,结构每层层高为3.3 m,梁的截面尺寸为300 mm×600 mm,柱的截面尺寸为500 mm×500 mm。梁、柱材料的等效弹性模量取 3.0×10^{10} Pa,等效质量密度为 $3\ 500\text{ kg/m}^3$ 。采用瑞雷阻尼计算结构的固有阻尼,附加阻尼器的阻尼

系数均为 $134\text{ kN}\cdot\text{s/m}$,阻尼指数为0.6。地震波分别采用El-Centro波和Taft波(以下分别简称E波、T波),峰值加速度 P_{GA} 取 $0.20g$ 和 $0.62g$ ^[31]。

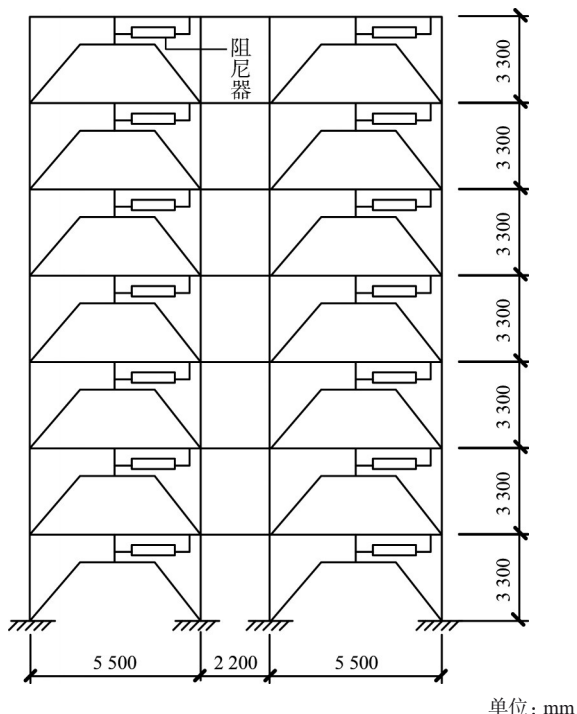


图6 平面框架及阻尼器布置示意图
Fig. 6 Schematic diagram of plane frame and its dampers

3.1 模态对比

按照总体操作流程图4,首先,根据上述模型信息在ABAQUS中建立图6的7层平面框架结构,用以采用全时程迭代法计算结构地震响应。由于复杂的阻尼器模型通常不能直接在ABAQUS中定义,一般需要基于Fortran的二次开发过程实现,为简化本文方法的验证过程,选择在MATLAB中进行此7层框架结构的建模,以采用直接积分法计算结构响应。在验证迭代方法前先检查模型建立的正确性,展示两种软件中建模后同种模型的前5阶模态对比和误差,如表1所示。

表1 ABAQUS和MATLAB模型前5阶模态对比
Tab. 1 Comparison of the first five modes of ABAQUS model and MATLAB model

模态	MATLAB	ABAQUS	误差/%
第1阶	13.664	13.663	0.007
第2阶	42.674	42.650	0.056
第3阶	76.678	76.546	0.172
第4阶	113.934	113.540	0.346
第5阶	144.894	141.556	2.304

由表1可知,前5阶模态的误差较小,尤其是第1、2阶的模态误差在0.1%以内,证明两者的建模非常接

近,可开始后迭代计算。

3.2 收敛性证明

以地震波为 E 波、 P_{GA} 取 0.20g 为例,每次迭代计算过程中最大层间相对速度如表 2 所示。

表 2 每次迭代的最大层间相对速度

Tab. 2 Maximum relative velocity of the stories in each iteration

迭代次数	$10^{-3} (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$						
	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层	第 7 层
1	5.792	8.458	8.362	8.076	7.273	6.095	3.713
2	5.352	7.898	8.164	7.881	6.931	5.641	3.325
3	5.294	7.816	8.130	7.849	6.915	5.571	3.266
4	5.286	7.804	8.125	7.844	6.912	5.561	3.257
5	5.284	7.802	8.125	7.844	6.912	5.559	3.255

为了便于进一步分析,绘制最大层间相对速度随迭代次数的变化规律,如图 7 所示。

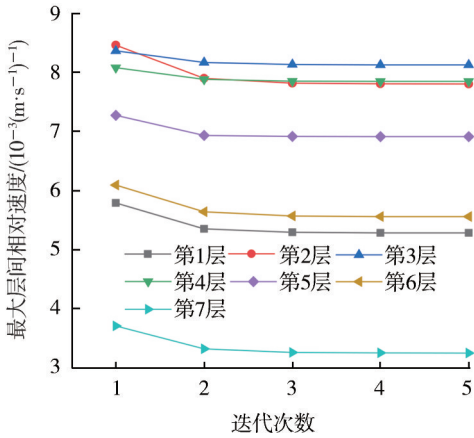


图 7 最大层间相对速度随迭代次数的变化规律

Fig. 7 Variation of maximum relative velocity with iteration times

每次迭代计算过程中每层楼的附加等效阻尼系数如表 3 所示。附加等效阻尼系数随迭代次数的变化规律如图 8 所示。

表 3 每次迭代的附加等效阻尼系数

Tab. 3 Additional equivalent damping coefficients of the stories in each iteration

迭代次数	$10^5 (\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^{-1}$						
	第 1 层	第 2 层	第 3 层	第 4 层	第 5 层	第 6 层	第 7 层
1	0.922	0.682	0.683	0.776	0.935	1.142	2.972
2	1.095	0.801	0.788	0.882	1.057	1.295	3.531
3	1.120	0.818	0.803	0.897	1.076	1.316	3.628
4	1.124	0.821	0.806	0.900	1.078	1.320	3.638
5	1.124	0.821	0.806	0.900	1.078	1.321	3.641

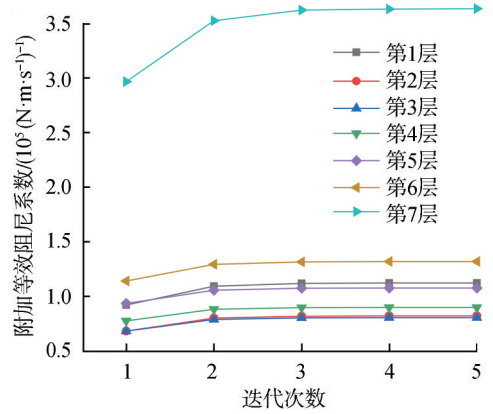


图 8 附加等效阻尼系数随迭代次数的变化规律

Fig. 8 Variation of additional equivalent damping coefficient with iteration times

由表 3、图 8 可知:从第 1 次迭代到第 2 次迭代,每层楼的最大层间相对速度和附加等效阻尼系数变化较大;到第 3 次迭代时变化减小;至第 4、5 次迭代时,这些参数基本保持不变,表明全时程迭代法的收敛速度较快。

3.3 模型地震响应分析

全时程迭代法与直接积分法的结构顶层最大位移对比如表 4 所示。

表 4 全时程迭代法与直接积分法的结构顶层最大位移对比
Tab. 4 Comparison of the maximum roof displacement of the structure between the inter-history iteration method and direct integration method

地震波	P_{GA}	结构顶层最大位移		误差/%
		直接积分法/m	全时程迭代法/m	
E 波	0.20g	0.036	0.035	2.78
	0.62g	0.107	0.104	2.80
T 波	0.20g	0.031	0.030	3.33
	0.62g	0.132	0.126	4.55

表 4 中,两种计算方法的误差率控制在 5% 以内,精度较高。 P_{GA} 取 0.62g 时的误差均大于 P_{GA} 取 0.20g 时。同时,全时程迭代法得到的计算结果比直接积分法的偏小,其原因是在附加等效阻尼系数的计算公式中,较大的反应量对应的滞回曲线较为饱满而较小的反应量对应的滞回曲线较为扁平,因此附加等效阻尼系数计算结果偏大,最终导致全时程迭代法的计算结果偏小。

平面框架结构顶层位移响应如图 9 所示。

图 9 中,当 P_{GA} 分别为 0.20g 和 0.62g 时,在 E 波和 T 波两条地震波作用下,分别用直接积分法和全时程迭代法计算出此框架黏滞阻尼器减震结构顶层的位

移响应。

由图9可知,本文提出的全时程迭代方法与直接积分方法所计算的7层框架结构顶层位移响应曲线重合度较高。

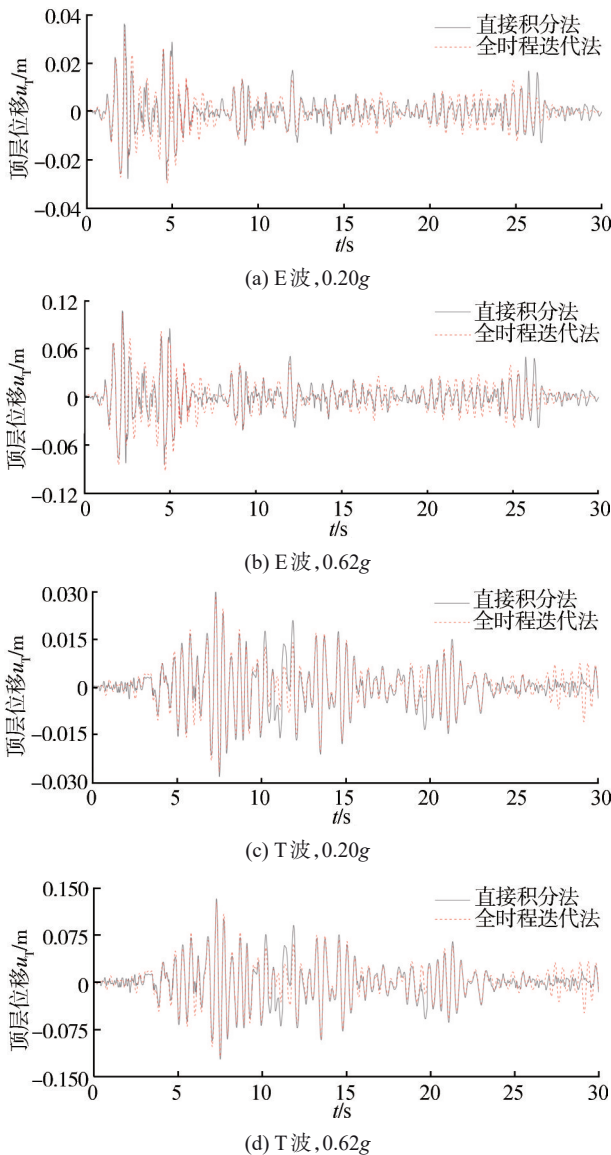


图9 全时程迭代法与直接积分法计算的平面框架结构顶层位移响应对比

Fig. 9 Comparison of roof displacement of the plane frame structure between the inter-history iteration method and direct integration method

4 结论

以等效线性化为基础推导出的全时程迭代方法,结合ABAQUS建模与后处理,提出基于全时程迭代的减震结构地震响应分析和ABAQUS二次开发以便更好地进行全时程迭代计算。以7层框架单榀结构为例进行分析,验证了其收敛性和精度。主要结论为:

1)全时程迭代方法是基于等效线性方法和多自由度结构推导的,具有充分的理论基础和物理意义。

2)全时程迭代方法计算减震结构地震响应分析收敛速度快、精度高,满足工程要求。

3)全时程迭代方法考虑了等效阻尼系数与结构相应的耦合作用。

4)ABAQUS二次开发的自动迭代计算程序可简便地实现全时程迭代法,促进了其在实际工程中的推广和应用。

附录见本刊网络版,扫描标题旁的二维码可阅读网络全文。

参考文献:

- [1] Liang Shahe, Zhang Zhiqiang, Li Aiqun. Seismic reduction principle and response analysis of variable damping viscous damper system[J]. International Journal of Structural Integrity, 2024, 15(1): 31–60.
- [2] Jia Chuanguo, Gou Yingqi, Li Jianguang, et al. Seismic response analysis method for structures with viscous dampers based on inter-history iteration[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(6): 89–97. [贾传果, 苟英旗, 李建广, 等. 基于全时程迭代的黏滞阻尼器减震结构地震响应分析方法研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(6): 89–97.]
- [3] Jia Chuanguo, Li Yutao, Su Hongchen, et al. The inter-history iteration method for seismic response analysis of seismically isolated structures and its secondary development based on ABAQUS[J]. The Structural Design of Tall and Special Buildings, 2024, 33(6): e2078.
- [4] Siami Kaleybar R, Tehrani P. Effects of using different arrangements and types of viscous dampers on seismic performance of intermediate steel moment frames in comparison with different passive dampers[J]. Structures, 2021, 33: 3382–3396.
- [5] Wang Zilong, Ren Wenjie. Research on optimization design for structure with viscous dampers based on genetic algorithm[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(2): 123–131. [王子龙, 任文杰. 基于遗传算法的黏滞阻尼器减震结构优化设计研究[J]. 世界地震工程, 2021, 37(2): 123–131.]
- [6] Chen Gaoyuan. Application research on viscous fluid dampers of a medical building in high intensity area[D]. Zhenzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023. [陈高源. 液体黏滞阻尼器在高烈度区医疗建筑中的应用研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.]
- [7] Morro A. Modelling of viscoelastic materials and creep behaviour[J]. Meccanica, 2017, 52(13): 3015–3021.

- [8] Bochnia J, Blasiak S. Stress relaxation and creep of a polymer-aluminum composite produced through selective laser sintering[J]. *Polymers*, 2020, 12(4):830.
- [9] Tyler R G. Preliminary tests on all energy absorbing element for braced structures under earthquake loading[J]. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1983, 16(3):201–212.
- [10] Tyler R G. Further notes on a steel energy-absorbing element for braced frameworks[J]. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1985, 18(3):270–279.
- [11] Jia Chuanguo, Li Yutao, Su Hongchen, et al. Numerical simulation and experimental investigation for the dynamic rocking response of two stacked rigid blocks[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, 569:118082.
- [12] Jia Chuanguo, Pan Jiafu, Yu Chenyang, et al. Research on the seismic response analysis method for the structures with metallic dampers based on inter-history iteration[J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2021, 23(3):64–73. [贾传果, 潘家富, 于晨洋, 等. 基于全时程迭代的金属阻尼器减震结构地震响应分析方法研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2021, 23(3):64–73.]
- [13] American Society of Civil Engineers. Minimum design loads for buildings and other structures: ASCE7—10[S]. Washington D C: American Society of Civil Engineers, 2010.
- [14] Wu Xingyi, Vanapalli S K. Three-dimensional modeling of the mechanical behavior of a single pile in unsaturated expansive soils during infiltration[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 145:104696.
- [15] Liang Jiali, Liang Jianwen. A user-defined element for dynamic analysis of saturated porous media in ABAQUS[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 126:103693.
- [16] Luo Weigang, Tao Yuru, Song Yirong. The RC frame structure failure mode based on ABAQUS secondary development[J]. *Journal of Civil Engineering and Management*, 2016, 33(5):1–5. [罗维刚, 陶昱儒, 宋一容. 基于 ABAQUS 二次开发的 RC 框架结构屈服机制[J]. *土木工程与管理学报*, 2016, 33(5):1–5.]
- [17] Gao Zhe, Yu Chaoshuai, Liu Zhaobin, et al. Application of Abaqus post-processing technique in diesel engine finite element analysis based on Python–Matlab[J]. *Tractor & Farm Transporter*, 2017, 44(4):46–49. [高喆, 禹朝帅, 刘钊宾, 等. 基于 Python–Matlab 的 Abaqus 后处理技术在柴油机有限元分析中的应用[J]. *拖拉机与农用运输车*, 2017, 44(4):46–49.]
- [18] Ye Zhengqiang, Li Aiqun, Cheng Wenrang, et al. Study on vibration energy dissipation design of structures with fluid viscous dampers[J]. *Journal of Building Structures*, 2001, 22(4):61–66. [叶正强, 李爱群, 程文瀛, 等. 采用黏滞流体阻尼器的工程结构减振设计研究[J]. *建筑结构学报*, 2001, 22(4):61–66.]
- [19] Lu Lyan Ywan, Lin Ging Long, Shih Ming Hsiang. An experimental study on a generalized Maxwell model for nonlinear viscoelastic dampers used in seismic isolation[J]. *Engineering Structures*, 2012, 34:111–123.
- [20] Du Yian. Study on performance of viscous damper applied to frame-supported tower[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018. [杜怡安. 应用于框架支撑式塔器的黏滞阻尼器性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.]
- [21] Winowlin Jappes J T, Khan M A, Vignesh V, et al. Design and simulation of skate scooter made of composite material[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 52:255–259.
- [22] Ganesh R, Dude D P, Kuna M, et al. ProCrackPlast: A finite element tool to simulate 3D fatigue crack growth under large plastic deformations[J]. *International Journal of Fracture*, 2023, 243(1):65–90.
- [23] Ding Li, Yu Chao, Zhang Xu, et al. Incremental strain gradient plasticity model and torsion simulation of copper micro-wires[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2023, 239:107891.
- [24] He Miao, Li Qi, Li Xiaying. A new simulator for hydromechanical coupling analysis of injection-induced fault activation[J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-energy and Geo-resources*, 2022, 8(2):43.
- [25] Wang Huakun, Gao Jing, Liu Tao, et al. Axial buckling behavior of H-piles considering mechanical-electrochemical interaction induced damage[J]. *Marine Structures*, 2022, 83:103157.
- [26] Gao Jingxiang, Cao Yongzhi, Wang Kaijie, et al. Polycrystalline simulation and experimental study of spatiotemporal anisotropy aluminum alloy irradiated by nanosecond laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142:107244.
- [27] Zhao Ying, Wang Yicheng, Hao Jibo, et al. Study on mechanical properties of cellular structures with negative Poisson's ratio based on the development of Abaqus plug-in tool[J]. *Composite Structures*, 2023, 322:117348.
- [28] Shen Yang, Moore R H, Deo A. Visualizing Abaqus output database in ParaView: A universal converter in Python and C++[J]. *SoftwareX*, 2023, 22:101331.

- [29] Gholami M, Afrasiab H, Baghestani A M, et al. Hygrothermal degradation of elastic properties of fiber reinforced composites: A micro-scale finite element analysis[J]. *Composite Structures*, 2021, 266: 113819.
- [30] Yuan Weihai, Wang Haocheng, Zhang Wei, et al. Particle finite element method implementation for large deformation analysis using Abaqus[J]. *Acta Geotechnica*, 2021, 16(8): 2449–2462.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范: GB50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

Seismic Response Analysis Method of Damping Structures Based on the Inter-history Iteration and Secondary Development of ABAQUS

JIA Chuanguo^{1,2}, QUAN Ziyu³, CHEN Xi⁴, LI Yutao²

(1. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

3. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4. Chongqing CZJZ Architectural Design Company Limited, Chongqing 401121, China)

Abstract:

Objective Two typical approaches for assessing the seismic response of a structure equipped with viscous dampers are direct integration methods and equivalent linear methods. Although direct integration methods provide precise results, their extensive computational cost and susceptibility to numerical instability stemming from the integration step hinder their practical use in most engineering applications. The equivalent linearization method provides a more tractable alternative by linearizing the system and incorporating stiffness and damping proportional to the response level. However, the equivalent linearization method is based on a single-degree-of-freedom structure, and the seismic response of the structure is assumed to be a sine function. For this reason, practical engineering applications of the equivalent linear method can also introduce errors. Therefore, proposing a simple yet highly precise analysis method to calculate the seismic response of a structure equipped with viscous dampers is of great significance.

Method This study introduces an alternative method for seismic response analysis of structures incorporating viscous dampers. Based on the equivalent linear method, the Maxwell model is used as the assumed restoring force model to account for dampers. The analysis is based on an inter-history iteration approach to simulate the response over time. In this approach, an extra equivalent linear damper replaces all dampers on each floor, and its supplementary equivalent damping coefficient is computed and updated based on the velocity response of the structure during an earthquake. Then, the velocity response of the structure is recalculated using the updated additional equivalent damping coefficient. This iterative process continues until the additional equivalent damping coefficient meets the specified criteria. The increasing adoption of finite element analysis (FEA) platforms in civil engineering enables high-precision simulation of structural dynamic behaviors through advanced numerical modeling techniques. Among the various finite element software options, ABAQUS stands out for providing several user-subroutine interfaces. These interfaces empower users to expand the functionality of the main program by writing specific function codes designed to their requirements. It becomes practical and meaningful to develop a seismic response analysis method by integrating the concept and approach of inter-history iteration and using the capabilities of ABAQUS software. This method aims to avoid complicated calculations and achieve rapid convergence, which is of great significance to the seismic design of structures equipped with viscous dampers in practical engineering.

Result and Discussion This study introduces the Maxwell viscous damper model at the beginning. After the brief introduction, the inter-history iteration method, grounded in the equivalent linear method, is presented. This method is used for the seismic response analysis of structures equipped with viscous dampers. ABAQUS is utilized to model and analyze a seven-story frame structure. Simultaneously, the seven-story frame structure is also modeled in MATLAB, which calculates the structural response using the direct integration method. The outcomes obtained through the direct integration method in MATLAB are used as the standard of comparison to the modeling and analysis in ABAQUS. The error of the first five modes is small, with the error of the first and second modes being less than 0.1%, demonstrating that the two modeling approaches are very close. The comparison and error of the first five modes in the two software verify the correctness of the model in ABAQUS. Python is further utilized to perform the secondary development of ABAQUS to realize the automatic iteration of the inter-history iteration method, thus obtaining a method that efficiently calculates the additional equivalent damping coefficient. Finally, a comparative analysis is conducted between the results obtained from the automated inter-history iteration method developed in ABAQUS and those from the direct integration method. The results demonstrated that, in the case of a seven-story frame structure, the inter-history iteration method exhibits strong convergence. In addition,

it aligns well with the top displacement response curve calculated using the direct integration method. The error in the results meets engineering accuracy requirements, confirming that the automatic inter-history iteration calculation method provides high calculation accuracy and reliability while enhancing analysis efficiency. The error rate between the two calculation methods remains within 5%, indicating high accuracy. Simultaneously, compared to the direct integration method, the inter-history iterative method produces a smaller calculation result. This discrepancy arises because, in the calculation formula of the additional equivalent damping coefficient, the hysteresis curve corresponding to a larger response amplitude is fuller, while the curve for a smaller response amplitude is flatter. Therefore, the calculated additional equivalent damping coefficient is larger, leading to a smaller result in the inter-history iteration method. The automatic inter-history iteration calculation method, developed through the secondary development of ABAQUS, reduces manual data processing complexity and minimizes operational errors, significantly simplifying the calculation process of the inter-history iterative method. Based on the analysis above, the inter-history iterative method demonstrates the potential for broader application in engineering practice.

Conclusion The inter-history iterative method presented in this study provides several advantages: 1) Utilization of ABAQUS. The seismic response analysis of damped structures is performed using ABAQUS, eliminating the need for a complex numerical integration method. 2) Efficiency of the iterative process. Unlike the extensive computational steps required by the numerical integration method, the inter-history iterative method achieves strong convergence with only a few iterations. 3) Nonlinear problem avoidance. The model employs an equivalent linear damper, allowing for the avoidance of nonlinear challenges.

Key words: seismic response; linearization; damping; ABAQUS; secondary development

(编辑 周璇)

引用格式: Jia Chuanguo, Quan Ziyu, Chen Xi, et al. Seismic response analysis method of damping structures based on the inter-history iteration and secondary development of ABAQUS[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(3): 51–60. [贾传果, 全姿宇, 陈曦, 等. 基于全时程迭代的减震结果地震响应分析方法与 ABAQUS 二次开发, 2025, 57(3): 51–60.]