

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2018.02.030

欢迎按以下格式引用:任晓崧,郑玉琴,周球尚.建筑结构抗震课程的动力分析演示软件[J].高等建筑教育,2018,27(2):122-126.

建筑结构抗震课程的动力分析演示软件

任晓崧,郑玉琴,周球尚

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:建筑结构抗震是土木工程专业的一门必修专业课,课程专业性强,涉及概念广泛且抽象。为帮助学生加深对课程知识的理解,培养学生创新实践能力,文章借助 MATLAB 语言的图形用户界面编制动力反应分析演示软件,针对课程教学中地震作用、反应谱和动力反应分析等要点,探讨如何在教学实践中提高学生自主学习和动手实践的能力。

关键词:建筑结构抗震;课程概念;MATLAB GUI;动力反应分析软件

中图分类号:G642.3;TU352

文献标志码:A

文章编号:1005-2909(2018)02-0122-05

调查显示,中国高校的课堂教学互动机制不够完善,知识的传授主要以“填充式”为主,缺少学生对课程的反馈,学生的知识接收过于被动,同时缺乏动手训练的机会,学生自主实践能力的培养较少^[1]。

文章将结合课程内容详细介绍基于 MATLAB GUI 的自制课程演示软件。软件由已修该课程的学生,同时也是现在的课程助教编制完成。软件编制目的是帮助学生对地震作用、反应谱理论和动力反应分析有更深刻的认识,提高课程教学效果,同时也为学生提供继续开发扩展的平台。

一、抗震课程教学体会

建筑结构抗震课程作为土木工程专业一门重要的专业课,在教学过程中受到学生的高度重视^[2]。该课程主要介绍结构抗震相关知识^[3],其中地震作用、反应谱和动力反应分析 3 个知识点,不仅是课程教学的要点,也是学生学习的难点。

1. 地震作用

地震作用指地震发生时地震波引起的地面运动对结构产生的影响。地震作用区别于一般的静力或动力荷载,是一种惯性作用,衡量地震作用的三要素分别为最大幅值、频谱特性和持续时间。最大幅值的概念较直观,即地震作用时程曲线中的最大值。频谱特性是指组成地震动的各简谐振动振幅和相位特性,频谱显示不同频率分量的强度分布,常用功率谱、幅值谱和反应谱来表

收稿日期:2017-01-24

作者简介:任晓崧(1968—),男,同济大学土木工程学院教授,博士,主要从事工程结构抗震研究,(E-mail)rxs@mail.tongji.edu.cn。

示。对学生而言,幅值和频谱特性对结构的影响容易理解,但持续时间的影响则相对抽象,不易察觉。持续时间对结构的破坏累积效应、低周疲劳现象和非弹性破坏有非常重要的影响,在时程分析和反应谱计算中都需考虑其影响。地震作用持续时间范围内,对结构造成破坏的只是地震作用强烈的部分。中国现行规范考虑了主要特性,即幅值和频谱特性对结构的影响。

2. 反应谱

单自由度体系动力计算是结构动力反应的基础知识。在地震激励作用下,其动力方程为

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega\dot{x}(t) + \omega^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

$$\ddot{x}(t) + \dot{x}_g(t) = \omega \int_0^t e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin\omega'(t-\tau) \ddot{x}_g(\tau) d\tau \quad (2)$$

方程的解分为自由振动和强迫振动两部分,其中强迫振动部分可通过杜哈梅积分求解得到。由于阻尼的存在,自由振动部分会很快衰减,强迫振动部分随之成为结构的稳态反应,式(2)为绝对加速度反应,即杜哈梅积分。结构的反应不仅与输入的地震动记录有关,还和结构本身的动力特性相关。从时域角度来看,地震动的幅值直接影响反应的最大值,持续时间则与结构的变形和疲劳有关。地震动的频域组成对结构的影响也十分显著,当结构固有频率靠近地震动卓越频域,动力反应放大作用十分明显。学生结合反应谱理论能更直观地理解地震动频谱特性对结构的影响。

抗震设计中,一般应用反应谱得到所关心的地震作用最大值,式(3)为绝对加速度反应最大值。反应谱是单自由度体系在地震动作用下,结构的自振周期与最大弹性反应之间的关系,体现了地震动对上部结构的作用,包含了共振效应的影响。反应谱是一条包含多个峰值的曲线,不同自振周期的结构在同一地震动作用下的反应也不相同。同时反应谱也受阻尼影响,阻尼越大,结构的地震反应越小。中国抗震规范^[4]使用的设计反应谱是由大量地震记录统计、拟合、调整后得到的标准加速度反应谱曲线,具有统计学意义,用于工程设计时,使用方便,克服了动力时程分析样本少、随机性强的缺点。因简便实用的特点,反应谱理论成为中国抗震设计最为常用的分析方法,但由于无法考虑地震持续时间的影响,存在一定的缺陷。在实际应用时,可根据震害情况和专家的工程经验适当调整。

$$S_a = |\ddot{x}(t) + \ddot{x}_g(t)|_{\max} \quad (3)$$

3. 动力分析

实际工程结构常假定为多自由度线弹性系统,其在地面运动作用下的运动微分方程是相互耦合

的。考虑阻尼影响下,多自由度体系的运动方程为

$$[M] \{\ddot{x}(t)\} + [C] \{\dot{x}(t)\} + [K] \{x(t)\} = -[M] \{\ddot{x}_g(t)\} \quad (4)$$

采用瑞利阻尼假定,如式(5),使阻尼矩阵也满足正交条件。

$$[C] = \alpha_0 [M] + \alpha_1 [K] \quad (5)$$

虽然多自由度动力分析较单自由度体系复杂,但只要能理解其求解过程的本质,便迎刃而解。利用振型关于质量矩阵和刚度矩阵的正交性,将多自由度体系解耦为多个振型对应的单自由度体系,采用杜哈梅积分得到各单自由度体系的反应,再通过各单自由度体系地震反应组合方式得出原结构体系的地震反应,这就是振型分解法的思想,如式(6)所示。在课程教学中,振型分解法是求解多自由度动力反应时重点介绍的方法。实际工程中,一般着重于最大动力反应的求解,因此常应用反应谱求得各振型对应的最大动力作用,进而得到各振型对应的动力反应,再根据一定的假定将各振型的动力反应进行组合得到结构的动力反应,这就是振型分解反应谱法。

$$\begin{Bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{21} & \cdots & X_{n1} \\ X_{12} & X_{22} & \cdots & X_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{1n} & X_{2n} & \cdots & X_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ \vdots \\ q_n(t) \end{Bmatrix} \quad (6)$$

振型分解反应谱法中几种常用的组合方式有绝对值相加法、通用模态组合法(GMC法)以及中国抗震规范采用的平方和平方根法(SRSS法)、完全平方根组合法(CQC法)。由于各振型的最大反应不会同时达到最大值,绝对值相加法过于保守,一般不采用。课程教学主要介绍的振型组合方法为SRSS法,即采用平方和平方根法,假设各振型的最大反应在统计学意义上相互独立,各振型间不存在耦合效应。这是基于工程经验的实用分析方法,已被证明具有很高的工程精度,当仅考虑基本振型的影响时可推导出更为简便的底部剪力法。但考虑扭转影响时,SRSS法则不再适用,规范中给出了考虑振型耦合的计算公式。

二、动力反应分析课程演示软件编制

MATLAB语言在复杂的数值分析、信号处理方面具有明显优势。当制作需要处理大量数据的软件时,可在GUI中利用MATLAB语言编写程序^[5]。软件界面要简洁直观,操作简单,可供用户反复使用,适合学生在课程教学中使用及二次开发。该自制软

件的流程如图1所示。

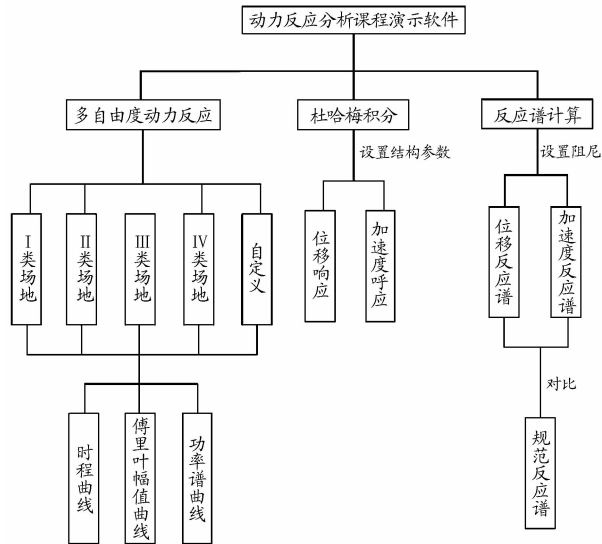
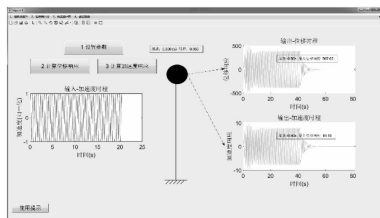


图1 自制课程软件使用流程

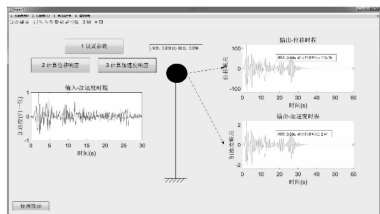
针对课程教学的需求,基于单自由度体系的课程自制软件设计为地震波输入、杜哈梅积分、反应谱计算三部分。学生可根据场地类型的不同选择相应的地震波输入,也可自行定义,得到相应的加速度时程、傅里叶谱和功率谱。设置结构的自振周期和阻尼,软件可自动计算加速度反应和位移反应。此外,通过改变不同的阻尼比,还能得到相应的位移反应谱和加速度反应谱,并与规范反应谱进行对比。

1. 动力反应的对比

外荷载激励下,结构的反应分为强迫振动和自由振动。以地震动和简谐荷载分别作用于结构的反应为例(其中单自由度结构自振周期为0.5,阻尼比0.05),对比两种情况结构反应的差异^[6]。运用软件计算得到周期为0.45 s的正弦激励和EI Centro地震波作用下的结构反应如图2所示。



(a) 简谐激励作用下的加速度、位移反应



(b) EI Centro地震记录作用下的加速度、位移反应

图2 不同荷载激励下的加速度、位移反应对比

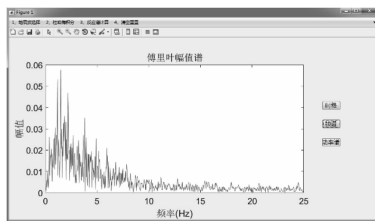
对比可知,简谐激励作用反应的开始段属于过渡段振动,振幅和周期均在变化,之后进入稳态反应

段,即以简谐荷载频率 ω_g 的强迫振动,外激励停止后进入自由振动,逐步衰减回到原始位置。EI Centro地震波作用下的结构反应较简谐激励作用下的激励小,因为简谐荷载的频率与结构固有频率接近,激起的共振效应更明显。还可添加其他形式的荷载,用软件算出其动力反应进行对比,对课程知识进行验证,直观感受不同情况下结构动力反应差异。

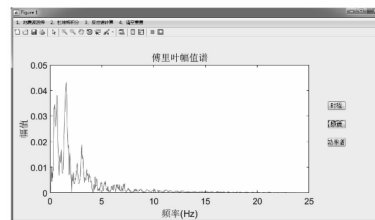
自由振动较强迫振动而言,对结构反应影响较小。学生一般认为,由于阻尼的存在,自由振动段会快速衰减,且随着阻尼的增大,结构的反应会减小。在课程助教的引导下,学生对此进行了扩展性讨论^[7]。在某些特定情况下,会出现自由振动段响应超过强迫振动段,且阻尼取较大值时,加速度反应比小阻尼情况下更大。此外,通过调整结构的初始速度和位移,发现虽然过阻尼情况下的阻尼比大于临界阻尼,但结构衰减后期的响应反而会出现比临界阻尼大的现象。通过课程软件的帮助,可有效培养扩展性思维,在深入理解课程知识的同时提升思维能力。

2. 地震动输入对结构反应的影响

结构动力反应不仅受自身动力特性影响,不同地震动输入时反应也有所不同。地震动作用时,不同地震波的频率分布各有差异,导致结构反应也不同。以二、四类场地地震动输入为例,学生用软件输出对应的傅里叶幅值谱,如图3所示,显示了地震波在频域范围内能量的分布情况。结构动力反应的实质就是其共振放大效应,结构的固有频率越接近地震波的卓越频率,则结构的反应越大。掌握地震动输入的频谱成分情况,可有效避免结构频率出现在不利频段上。



(a) II类场地地震波频谱特性



(b) IV类场地地震波频谱特性

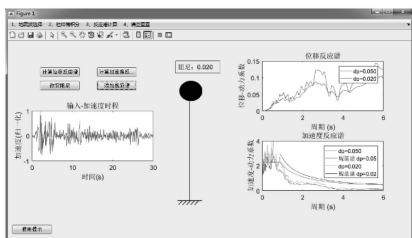
图3 不同场地地震波频谱特性对比

3. 对反应谱的理解

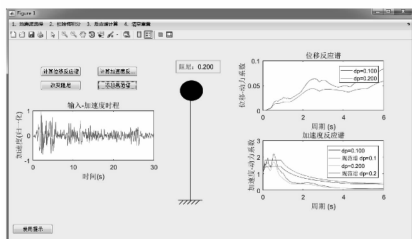
地震作用下结构最大反应的计算可通过反应谱理论得到,与结构自振周期和阻尼比有关。设计反

应谱是经过大量地震记录的统计分析和拟合得到的结果。中国抗震设计规范针对不同的场地类型和阻尼比,对设计反应谱进行了修正。图4为软件计算得到的不同条件下加速度反应谱和位移反应谱,通过添加设计反应谱加以对比。

从图中可以看出,阻尼越大,反应谱的值越小。实际反应谱是具有多个峰值的曲线,设计反应谱在实际反应谱的基础上经过平滑处理,便于工程应用。对于某些频段,降低设计反应谱值是出于实际需求,但其合理性还有待验证。通过软件对比实际反应谱和设计反应谱,可以帮助理解反应谱的实质及影响因素,进而探讨设计反应谱的合理性。



(a) 阻尼比为0.02与0.05的反应谱对比



(b) 阻尼比为0.1与0.2的反应谱对比

图4 不同阻尼下单自由度体系反应谱对比

三、多自由度体系反应动力分析设想

实际工程中常见的多自由度体系,由于自由度的增加使其动力反应的求解变得复杂。目前有很多商业软件可进行多自由度体系的动力反应计算,如ANSYS、SAP2000、ABAQUS等。这些软件操作简便,易于掌握,可作为课程教学辅助工具,但其计算过程可视性不足,无法对比各影响因素对结构反应的影响,缺乏较好的教学示范性,缺乏体系动力反应求解过程和影响因素的分析^[8-10],对学生理解振型分解法、振型分解反应谱法的帮助并不明显。

文章介绍的动力反应分析课程演示软件是针对单自由度体系编制的,能帮助学生加深对地震作用、单自由度体系地震反应分析、反应谱及其设计反应谱等教学要点的认识。多自由度体系动力反应的求解也是课程教学中十分重要的一部分,该内容在课程演示软件中尚未实现,并非软件编写和实现方面的困难,而是由于多自由度体系的动力计算较为复杂,影响其动力反应的因素较多,除了与单自由度体系共有的影响因素之外,还涉及各振型之间的相互关系,通过软件演示,并不容易起到教学示范的效

果。对于较规则的结构,且当楼层参数(质量、刚度等)变化不大时,其动力求解的影响因素减少,可简化为糖葫芦串模型,作为编写演示软件的对象。软件的编写强调对比性,旨在起到较好的教学示范性。在课程教学中,对比是非常有效的一种学习方法。通过各影响因素改变后结构反应的对比,帮助理解并快速掌握相关知识。主要体现在以下几方面:

第一,单自由度和多自由度整体的对比。多自由度体系求解基于单自由度体系的解耦过程,再由多个单自由度体系动力反应通过某种组合方式得到结构整体的反应。课程教学中,学生反映多自由度体系与单自由度体系相互转换的过程不直观。因此,在软件设计时,可选择合适的参数,分别演示各振型对应的单自由度体系反应及结构整体反应,并互相对比分析,动态展现由多自由度到单自由度再到多自由度的整个过程,便于学生熟悉多自由度体系动力反应的计算过程。

第二,振型相关概念的对比演示。在多自由度体系动力分析教学中,振型、振型参与系数、振型参与质量是很重要的概念。振型即单自由度体系在振动的任一时刻,各质点位移的比值保持不变的振动形式。振型参与系数和振型参与质量都具有明确的物理定义。振型形式和振型参与系数直接影响各振型中质点的动力作用,进而影响结构整体的反应。而振型参与质量决定参与计算的振型数量,即振型参与质量不少于总质量的90%。软件编制时通过一定的设计,展现各振型的形式及振型参与系数和参与质量的数值大小。借助软件,改变参与计算的振型数量、结构参数等,振型相关量的值也会随之变化,从而得到不同的动力反应。

第三,反应谱方法的应用。反应谱的应用对象是单自由度体系,多自由度体系计算时每个振型对应的单自由度体系反应可用反应谱求解。在已有软件的基础上计算得到反应谱,根据每个振型的周期,求出对应的动力反应。结构整体的反应由各振型对应的反应通过一定的组合方式得到。软件编制时涵盖各种组合方式,学生可任意选择,并对不同组合方式产生的结果进行对比,分析不同组合下结构反应的区别,理解平方和平方根法(SRSS法)。图5为多自由度体系动力计算流程的示意图。

第四,底部剪力法的对比演示。当结构响应以第一振型为主时,振型分解法便可简化为底部剪力法,即只有第一振型参与。各质点的动力作用可近似地取为第一振型各质点对应的动力作用。当结构基本周期较长时,计算得到的顶部动力作用偏小,需在顶点附加地震作用。对于突出屋面的小房间,质量和刚度突然减小,动力反应增大,对此处的动力作

用乘以系数3,且不往下传递。软件编制时可设计多质点结构的模型,分别展示每个质点对应的结构参数、动力作用及动力响应,建立简单直观的力学模型。通过模型能直观地看到结构每层动力作用和动力反应相应的变化,以及对结构整体反应的影响程度,进而对底部剪力法计算过程的认识更加清晰,便于理解底部剪力法与振型分解法的区别和联系。

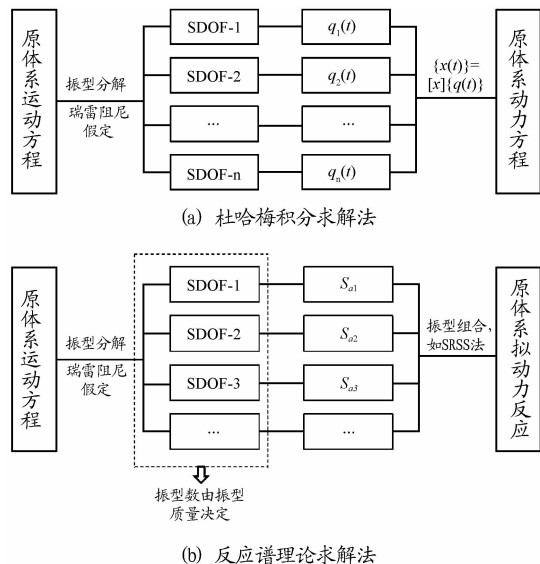


图5 多自由度体系动力反应计算流程

四、结语

基于教学实践,编写了动力反应课程演示软件,通过不同情况的对比模拟,将抽象概念可视化和直观化。作为一种新颖有效的教学辅助工具,演示软件可帮助学生克服概念理解上的困难,深化对地震作用、反应谱和动力分析等知识点的理解。学生在运用软件时,通过改变不同的参数,对比分析相应结

果,不仅可加深对概念的理解,还能培养学生的动手实践能力,激发创新性思维。该课程演示软件应用方便,操作简单,具有一定的继续开发价值,下一步将针对多自由度体系的反应分析深化开发,力求在建筑结构抗震课程教学实践中有更广泛的应用价值。

参考文献:

- [1] 吕林海,张红霞. 中国研究型大学本科学习参与的特征分析——基于12所中外研究型大学调查资料的比较[J]. 教育研究,2015(9):51-63.
- [2] 吕西林. 建筑结构抗震设计理论与实例[M]. 上海:同济大学出版社,2015.
- [3] 任晓崧,郭雪峰,周球尚. 对建筑结构抗震课程教学的思考[J]. 高等建筑教育,2015,24(4):55-58.
- [4] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [5] 宗节保,段柳云,王莹,等. 基于MATLAB GUI软件制作方法的研究与实现[J]. 电子设计工程,2010,18(7):54-56.
- [6] 任晓崧. 建筑结构抗震设计[M]. 大连:大连理工大学出版社,2015.
- [7] 钟源,任晓崧. 培养拓展性思维的教学探索——以阻尼比对单自由度体系动力响应影响为例[J]. 高等建筑教育,2017,26(2):93-97.
- [8] 北京金土木软件技术有限公司. SAP2000中文版使用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [9] ABAQUS, Inc. ABAQUS Analysis User's Manual [EB/OL]. [2017-03-12]. <http://www.abaqus.com>,2004.
- [10] 王新敏. ANSYS工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.

Dynamic analysis demonstration software of structural seismic design course

REN Xiaosong, ZHENG Yuqin, ZHOU Qiushang

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China)

Abstract: Structural seismic design is a professional course for the undergraduate students in the college of civil engineering. As for the strong professional background, its content is widely involved with the non-instinctive content. In order to deepen the knowledge of this course and train the ability of practice for the student, the dynamic analysis demonstration software is written by MATLAB GUI. Focusing on the key issues as earthquake action, response spectrum and dynamic response analysis, improving teaching effect is discussed for better learning and practice of students.

Keywords: structural seismic design; course concept; MATLAB GUI; dynamic analysis demonstration software