

基于建筑规范反应谱的人工地震波合成及其应用

梁 意¹, 肖承波², 吴 体², 徐 洲¹, 范举国¹

(1. 西华大学建筑与土木工程学院, 成都 611930; 2. 四川省建筑科学研究院, 成都 510106)

摘 要:规范规定采用时程分析法时应选用相当数量与统计意义相符的地震加速度时程曲线。鉴于实际工程中与拟建场地同震源的原始地震纪录较少,合成满足一定振动特性的人工地震波参与计算显得十分必要。根据人工地震动合成原理,利用规范反应谱 v2.0 程序和 Simqke_gr 程序生成拟合标准反应谱的地震波,并将其应用于某典型超限底框结构实际工程的弹性动力时程分析中。实例分析结果表明:采用程序合成的人工地震波,在概率意义上有一定代表性,能够很好地拟合于规范反应谱,同时使用方便、可靠,可用于工程实际中。

关键词:建筑规范反应谱;人工地震波;Simqke_gr 程序

中图分类号:TU352

文献标志码:A

引 言

现阶段,国内外对不规则、体型复杂的高层建筑进行动力有限元分析时,通常是把地震动的激励-加速度时间函数直接输入到所建结构的力学模型中以观察其各种地震响应。我国规范规定对结构的地震反应进行动力分析时,应根据工程所在地的场地特性选择同震源的原始地震记录和人工模拟的地震动^[1]。历次地震灾害也表明,尽管某一次强烈地震的作用时间很短,建筑不会立即产生严重破坏,但由于强烈地震发生总伴随着多次余震,在余震作用下结构往往会长时间处于动力非线性状态,产生不可恢复的塑性变形,甚至损伤累积达到一定程度时发生连续性倒塌^[2]。因此,对于复杂结构或超限结构,有必要通过时程分析掌握其抗震性能,做到有的放矢。然而实际工程中可用于建设场地的原始地震纪录(即场地条件、传播途径、震源距离、震级等因素的影响均符合使用场地的记录)较少,即使某条天然波的震中距、震级及谱的卓越周期与拟建场地的动力特

征接近,地震动的频谱特性也可能存在较大差异,导致计算的结果与实际不相符。鉴于反应谱作为抗震设计验算的依据,拟合出与之相应的人工波参与时程分析就显得更有价值。20 世纪七十年代以来,国内外不少学者从地震的功率谱出发提出了基于数学模型合成满足需求烈度、持时及频谱特性的人工地震波来模拟地震工作,但关于如何确定潜在地震的功率谱,学者们做过不少研究,获得了一些结论。也有学者尝试以规范反应谱为目标谱的方法合成人工地震波,并针对这种方法做了大量研究。本文基于以规范谱为目标谱的理论,结合某分析案例,介绍了一种采用小型程序模拟人工加速度时程的简易方法,所合成人工波的反应谱与规范反应谱拟合较好,有较高收敛精度,程序稳定可靠且操作简单。

1 人工合成地震动基本原理

经过几代科研工作者的不懈努力,地震工程学的研究取得了不少成果,大量学者根据随机振动理论,建立

收稿日期:2016-06-19

基金项目:西华大学研究生创新基金项目(ycyj2016182)

作者简介:梁 意(1988-),男,湖南常德人,硕士生,主要从事结构抗震方面的研究,(E-mail):iron_kingsly1223@163.com;

吴 体(1970-),男,四川邻水人,教授级高工,主要从事建筑结构抗震加固方面的研究,(E-mail):wuti@tsinghua.org.cn

了多种随机地震动模型。但由于地震动的断层机制、震源特点、传播路径等因素难以确定,地震波表现出强烈的不确定性,建立的地震动模型仍然尚不完善。现今国内较常用的地震动模型有很多^[3],本程序选用了金井清功率谱模型,该模型为典型的过滤白噪声模型,因其考虑了均匀土层对地震的滤波效果而被地震工程领域广泛采用^[4]。根据采用的数学方法不同,模拟的人工加速度时程实质上可分为两种:一种认为所有地震动均可由若干项不同周期的三角级数的迭加组成,另一种认为地震动是由多条赋有特定振幅的随机脉冲的迭加组成。本程序沿用第一种方式,认为任何一条地震波的非平稳加速度时程均可由一个考虑强度非平稳性的时间包络函数乘以平稳的人工加速度时程得出^[5]。因此,地震加速度时程为:

$$a(t) = f(t)a_s(t) \quad (1)$$

式中, $f(t)$ 是时间包络函数, $a_s(t)$ 是平稳的地震加速度时程。 $a_s(t)$ 公式中迭加的各幅值分量可通过目标反应谱 $S_a^T(\omega)$ 与功率谱 $S(\omega)$ 的转换关系式求得, $f(t)$ 、 $a_s(t)$ 具体公式可参见文献[6]。有研究表明虽然按照上述方法采用规范谱为目标谱求解得到了平稳的地震动加速度时程,但生成波的反应谱与规范谱仍存在一定的差距。为确保拟合精度,本程序只适用于特征周期小于 6 s 的场地,针对长周期谱值特征的人工波,建议另行编制程序,程序中宜考虑李建波等人提出的初筛准则进行筛选和预校正^[7],同时建议合成过程中考虑天然地震动的非平稳特征,其时间强度包络线信息和相位信息按照天然地震波采用^[8];针对其他高频地震波,建议程序中宜基于小波理论对规范谱做小波分解并在高频部分施加噪声,利用小波变换合成人工地震波^[9],做到不同场地环境采取相应方法以提高计算速度和所求地震波反应谱的拟合精度。为提高计算效率,程序使用数字滤波法时通常还采用了一项快速傅立叶变换(FFT)技术计算 $a_s(t)$ 。基于规范反应谱合成人工地震动的原理大致可总结为:从标准反应谱出发,采用 Maharaj K. Kaul 所推演的加速度反应谱与功率谱之间的近似关系式,根据规范谱求得相应的功率谱,再从功率谱合成人工地震动,并把这一过程编制成计算机程序,通过相关规范输入该建设场地的基本信息,以生成工程所需要的人工地震波。

2 程序合成人工地震动的设计思路及操作流程

本文分析的实际工程采用了中国建筑抗震设计规

范反应谱 v2.0 程序和 Simqke_gr 程序来合成人工地震动。反应谱 v2.0(2012a) 程序依据新、旧抗震规范的修改,相应提供了 2001 和 2010 两个版本,每个版本均要求在 Matlab(2012a) 平台下才能正常运行,程序通过修改拟建场地参数可输出各类场地条件下的反应谱数据文本文件。Simqke_gr 程序根据输入的谱数据通过迭代法求解功率谱密度函数,继而由功率谱求解傅立叶幅值谱,后经傅立叶逆变换 (FFT^{-1}) 技术,得到平稳地震加速度时程曲线。该曲线乘以时间包络函数则得到所需要的非平稳的加速度时程曲线。程序设计思路具体为:

(1) 依据抗震设计规范确定拟建场地的类别、设防烈度、阻尼比等相关参数,得到地震影响系数。

(2) 根据地震影响系数确定规范反应谱,通过迭代法或者直接法,由规范反应谱 $S_a^T(\omega)$ 求解输入地震波的功率谱密度函数 $S(\omega)$ 。

$$S(\omega) = \frac{\xi}{\pi\omega} [S_a^T(\omega)]^2 \frac{1}{\ln\left[\frac{-\pi}{\omega T} \ln(1-p)\right]}$$

式中, ξ 为阻尼比, p 为反应超过反应谱值的概率,建议 $P \leq 15\%$, T 为持续时间。

(3) 选用金井清功率谱模型,用 MATLAB 的非线性拟合功能对功率谱密度函数进行拟合,得到金井清模型相应参数 wg 、 ξg 。

(4) 计算幅值谱 $A(\omega)$ 。

$$A(\omega) = [4S(\omega)\Delta\omega]^{\frac{1}{2}}$$

(5) 由傅立叶幅值谱 $A(\omega)$ 与随机相位谱 $\varphi(\omega)$ 经傅立叶逆变换,得到近似的平稳人工波加速度时程:

$$a_s(t) = FFT^{-1}[A(\omega)e^{i\varphi(\omega)}]$$

$i = \sqrt{-1}$ 为虚部。

(6) 将平稳地震加速度时程 $a_s(t)$ 乘以考虑非平稳性的时间包络函数 $f(t)$ 即可得到非平稳的地震时程 $a(t)$, 见式(1)。

(7) 比较由非平稳性的人工加速度 $a(t)$ 经运算处理求得的反应谱 $S_{ak}(\omega)$ 和标准反应谱 $S_a^T(\omega)$ 。若相对误差 $E(\omega)$ 在允许范围内,则保留 $a(t)$ 。

$$E(\omega) = \frac{S_{ak}(\omega) - S_a^T(\omega)}{S_a^T(\omega)} \times 100\%$$

否则,所求幅值谱应乘以修正系数 K , 如:

$$A_{k+1}(\omega) = A_k(\omega)K$$

$$K = \frac{S_a^T(\omega)}{S_{ak}(\omega)}$$

重复第(5)~(7)步,循环迭代,直至相对误差满足要求,迭代结束,保留 $a(t)$,即为生成的人工波时程。

3 某典型超限底框砌体结构的地震反应分析

某综合楼下部五层为钢筋混凝土框架-剪力墙、上面十层为砖混(负二层~三层为框-剪,四层~十三层为砖混),属于典型超限底框砌体结构,采用 SAP2000_V.15.1 有限元软件建立的三维模型如图 1 所示。查阅该建筑早期的设计资料,得到基本信息:该建筑抗震设防类别为丙类,II 类场地,地震分组为第一组,抗震设防烈度为 6 度。考虑到地震是一种突发的、无法精确预估的地质活动,因此很有可能发生比设防烈度更大的地震。如发生于 1976 年 7 月 28 日的中国唐山地震,其震中烈度为 11 度,震级达到 7.8 级,而该地区的基本设防烈度仅为 6 度;发生于 2008 年 5 月 12 日的汶川地震,其震中烈度同样也为 11 度,震级为 8.0 级,而地区基本设防烈度却只有 7 度。为观察上述组合结构在超越设防烈度地震作用下的动力响应,本文分析时采用了烈度为 7 度多遇的反应谱和地震时程曲线,限于篇幅原因,文中并未对结构的动力响应分析进行详细展示,只针对所采用的人工地震动合成方法及其适用性进行讨论。

对结构进行弹性动力时程分析时很多工程设计人员习惯采用国内广泛接受的“3+1”选波方案。该类小样本容量选波方案,通常根据结构底部剪力、底部弯矩、层间位移等这些结构响应指标选用地震波。然而,杨志勇等人通过对大量实际工程的动力弹塑性全过程进行分析提出,地震波离散性依据所采用的结构响应指标不同而存在差异,底部剪力较其他结构整体响应指标而言,其平均值更接近于振型分解反应谱法求得的结果^[10],建议根据基底剪力的响应结果选用地震波。同时,杨红认为框架结构中梁、柱构件的塑性变形能力采用“3+1”方案分析所得的结果偏小,建议可适当增加地震波数量减小偏差^[11]。因此本算例采用 8 条地震波(4 条天然波,4 条人工波)进行弹性时程分析,天然波根据杨溥、王亚勇等人建议采用反应谱的两个频率段进行选波^[12-13],人工波采用规范反应谱 v2.0 程序(适用规范 GB50011-2010 版本)和 Simqke_gr 程序生成拟合标准反应谱的地震波。针对基底剪力响应结果进行分析,三向输入时加速度峰值按中国规范推荐的 1:0.85:0.65 的比例调整。图 2 为 Simqke_gr 程序生成的人工波波

形,图 3 为 Simqke_gr 程序生成的人工波反应谱与规范反应谱的拟合情况。表 1 为 7 度多遇地震作用下 8 条地震波的弹性时程分析结果与反应谱分析计算结果的比较,表 2 为不同数量地震波的离散性分析结果。

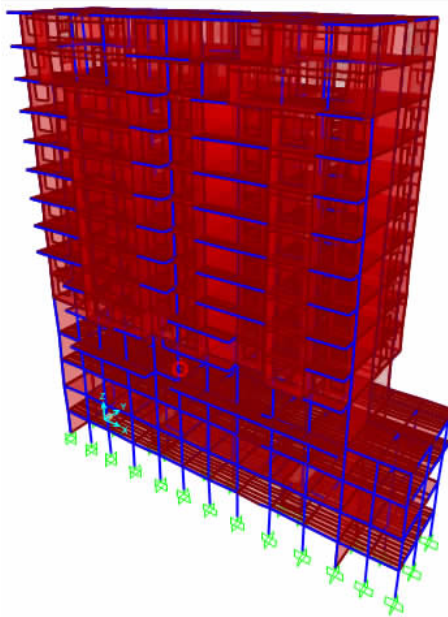


图 1 某综合楼 SAP2000 三维模型

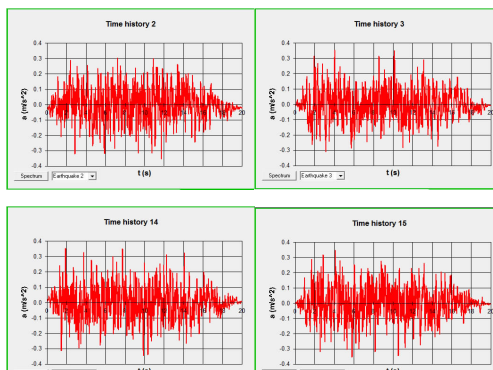


图 2 Simqke_gr 程序生成的人工波波

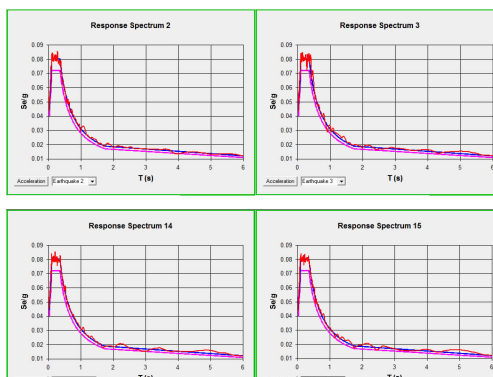


图 3 Simqke_gr 程序生成的人工波反应谱与标准谱拟合情况

表1 三向输入7度多遇地震作用下弹性时程分析结果

地震波	基底剪力/kN	基底剪力比值/%
反应谱	2934.5	100
天然波1(Lanzou1)	2485.6	84.7
天然波2(LAN3-3)	2220.7	75.7
天然波3(TH2TG035)	5471.4	186.4
天然波4(TH4TG035)	3130.4	106.6
人工波1(response.2)	2324.4	79.2
人工波2(response.3)	2764.1	94.1
人工波3(response.14)	2451.9	83.5
人工波4(response.15)	3007.9	102.5

表2 不同数量地震波的离散性分析

地震波选取	基底剪力均值/kN	基底剪力标准差/kN
4条天然波	3327	1281.5
4条人工波	2637.1	267.3
4条天然波+1条人工波1	3126.5	1214.3
4条天然波+2条人工波1,2	3066.1	1116.7
4条天然波+3条人工波1,2,3	2978.4	1056.0
4条天然波+4条人工波1,2,3,4	2976.8	987.8

根据图2、图3和表1、表2的计算结果,能够做出如下分析:

(1)从生成的人工波波形及人工地震波反应谱与规范谱的拟合曲线分析,仅局部存在某些点偏离谱曲线较大,实际应用中可根据具体工程的动力特性筛选局部点偏离对地震反应分析响应结果影响较小的人工波。

(2)不论选取的是天然波还是人工波,单条地震波计算所得的基底剪力均不小于振型分解反应谱法计算结果的65%,多条地震波计算所得的基底剪力平均值不小于振型分解反应谱法计算结果的80%,均应满足我国《建筑抗震设计规范》对时程分析时的要求。

(3)以底部剪力为结构响应指标就地震波离散型而言,天然波的离散型要大于人工波。4条天然波的标准差为1281.5 kN,4条人工波的标准差为267.3 kN,与反应谱基底剪力比值相差最大的天然波为TH2TG035,差值达86.4%,相差最大的人工波为response.2,差值达20.8%。随人工波参与的数量增多,基底剪力平均值越接近于反应谱基底剪力值,相应基底剪力的标准差也越小,表2中8条地震波的基底剪力平均值与反应谱分析结果比较,相差仅1.4%,标准差也由4条天然波时的1281.5 kN下降至987.8 kN。

4 结论

通过利用Simqke_gr程序合成标准反应谱人工地震动,并将生成的地震动应用于某典型超限底框砌体结构分析中,主要得到以下结论:

(1)依据规范反应谱v2.0程序和Simqke_gr程序合成的人工地震波,其反应谱与规范反应谱拟合较好,可应用于实际工程中。

(2)通过分析表明,结构弹性时程分析选择地震波时,如果得不到与拟建场地预测地震同震源的原始记录,采用拟合迭代于标准反应谱的人工波参与计算是完全可行的。

(3)输入天然地震波所得到的响应结果偏差较大时,通过适当增加拟合规范反应谱的人工波数量可减小天然波的离散性。

参考文献:

- [1] GB 50011-2010,建筑抗震设计规范[S].
- [2] 周福霖,崔鸿超,安部重孝,等.东日本大地震灾害考察报告[J].建筑结构,2012,42(4):1-20.
- [3] 沈聚敏,周锡元,高小旺,等.抗震工程学[M].北京:中国建筑出版社,2000.
- [4] 李鸿晶,陈辰.一种平稳地震地面运动的改进金井清谱模型[J].工程力学,2014,31(2):158-163.
- [5] 杜修力,陈厚群.地震动随机模拟及其参数确定方法[J].地震工程与工程振动,1994,14(4):1-12.
- [6] 牛志国,李同春,王亚莉.基于水工设计反应谱的人工地震波合成[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(3):262-266.
- [7] 李建波,牛翔,林皋.基于长周期谱值特征的人工地震波初筛与预校正研究[J].大连理工大学学报,2016,56(2):127-130.
- [8] 刘平,李宁,李忠献,等.考虑天然地震特征的长周期人工地震动合成[J].土木工程学报,2013,46(12):43-48.
- [9] 张郁山,赵凤新.基于小波函数的地震动反应谱拟合方法[J].土木工程学报,2014,47(1):70-80.
- [10] 杨志勇,黄吉锋,邵弘.弹性与弹塑性动力时程分析方法中若干问题探讨[J].建筑结构学报,2008,29(S1):213-217.
- [11] 杨红,吴晶晶.考虑结构局部反应特征的时程分析

- 法输入地震波研究[J].土木工程学报,2007,40(11):29-35.
- [12] 杨溥,李英民,赖明.结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J].土木工程学报,2000,33(6):33-37.
- [13] 王亚勇,程民宪.结构抗震时程分析法输入地震记录的选择方法及其应用[J].建筑结构,1992(5):3-7.

Synthesis and Application of Simulated Earthquake Waves Based on Building Design Response Spectrum

LIANG Yi¹, XIAO Chengbo², WU Ti¹, XU Zhou¹, FAN Juguo¹

(1. School of Architecture and Civil Engineering of Xihua University, Chengdu 611930, China;

2. Sichuan Institute of Building Research, Chengdu 510106, China)

Abstract: The building regulations of China rule that a number of the curve of earthquake acceleration time history should be chosen in a time history analysis method which are consistent with statistical significance. In view of the original seismic record is less that are appropriate for the proposed site when the time history analyzing for a complex structure, synthesizing artificial seismic wave to participate in calculation is very necessary. Based on the synthesis principles of artificial earthquake wave, the programs of standard response spectrum v2.0 and Simqke_gr are used to generate seismic wave on fitting standard responsespectrum, which are applied to elastic time-historydynamic analysis of a practical engineering of typical transfinitebottom-frame structure. The analysis result shows that artificial seismic waves on iterative fitting standard response spectrum not only has a certain representativeness sense in probability meaning, but are more reliable. Adoptingthe seismic wave synthesized through the above procedures may well be suitable for the standard response spectrum, and is easy and convenient to use, so that it can be used in engineering practice.

Key words: building design response spectrum; simulated earthquake wave; program of Simqke_gr