



同濟大學

TONGJI UNIVERSITY

博士学位论文

工程随机地震动的物理模型研究

(国家自然科学基金重点项目 编号: 51538010)

(国家自然科学基金重大国际合作研究项目 编号: 51261120374)

姓 名: 丁艳琼

学 号: 1210192

所在院系: 土木工程学院

学科门类: 工 学

学科专业: 结构工程

指导教师: 李杰 教授

二〇一八年七月



同濟大學
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to
Tongji University in conformity with the requirements for
the degree of Doctor of Philosophy

Study on Physical Model of Stochastic Seismic Ground Motions for Engineering

(Funded by the National Natural Science Foundation of China, Grant No. 51538010; by the National Natural Science Foundation of China for Major International Joint Research Project, Grant No. 51261120374)

Candidate: Yanqiong Ding
Student Number: 1210192
School/Department: Civil Engineering
Discipline: Civil Engineering
Major: Structural Engineering
Supervisor: Prof. Jie Li

July, 2018

摘要

本文在对地震动记录进行聚类分析的基础上,致力于建立一套考虑震级、传播距离和场地类别影响的工程随机地震动物理模拟体系。

发展了两类地震动记录聚类方法:一类以地震动记录的能量分布为聚类依据,另一类以震级和传播距离为聚类依据。在第一类方法中,定义了能量集中频段作为反映地震动能量分布的基本物理参数。收集整理了 7778 条水平强震记录,按照场地类别划分为 4 组,再将每类场地类别下的地震动记录按照两种聚类方法分别聚为 3 组。对比分析每种聚类方法得到的 12 组地震动记录的频谱特性,发现两种聚类结果表现出相同的规律。在上述研究基础上,本文建议以震级和传播距离作为地震动记录聚类分析的依据,得到了可以分别反映不同场地类别、不同震级和传播距离影响的 12 组地震动记录。

详细剖析了工程随机地震动的物理模型,以上述地震动记录分组聚类结果为基础,对工程随机地震动物理模型中的基本随机参数进行识别和分组统计。其中,震源参数和传播途径参数按照不同聚类分组进行统计,场地参数按照不同场地类别进行统计,从而给出了工程随机地震动物理模型中基本随机参数分别针对不同地震记录分组的定量概率分布模型。最终完成了工程随机地震动物理模型的参数建模,得到了能够反映不同场地类别和震级、传播距离影响的工程随机地震动量化模型。

研究了地震动的相位特性,发现了地震动持时与相位谱之间的物理关系,从而给出了由模型相位谱估算模拟地震动持时的方法。以此改进了地震动合成的窄带波群叠加方法,并用于随机地震动模拟。采用工程随机地震动的物理模型和改进的窄带波群叠加方法重构不同场地的实测地震动记录样本,将样本的幅值谱、相位差分布以及时程与实测记录进行对比,验证了模型及模拟方法的有效性。

依据上述工程随机地震动物理模型的定量建模结果,采用概率密度演化分析理论求解上述随机地震动模型的概率分布与数值特征,并与实测地震动记录的统计结果进行对比,验证了本文给出的定量随机地震动模型的正确性。以 II 类场地第 2 组地震动为例,给出了详细的对比结果。

选取 4 组不同场地类别、不同聚类分组的模拟随机地震动时程,用于某 5 层框架结构的随机地震响应分析。对结构的随机响应进行概率密度演化分析,并采用基于极值分布的可靠度计算方法得到了结构在不同分组随机地震动作用下的失效概率。通过与规范推荐的反应谱方法的分析结果进行对比,发现按照规范设计安全的结构,实际上可能面临较大的破坏风险。从而从实证角度进一步说明了本文研究的意义与必要性。

本文工作为定量评价结构在不同场地类别和不同震级、传播距离影响的地震动作用下的可靠性提供了基础。

关键词: 地震动聚类分析, 物理模型, 随机地震动模拟, 概率密度演化方法, 工程结构可靠度

ABSTRACT

In this thesis, a physical based stochastic earthquake ground motion model for engineering purpose is developed. Based on the cluster analysis of earthquake ground motion records, the present model takes the influence of magnitude, propagation distance and site class into consideration.

Two kinds of cluster methods are introduced. One is based on the energy distribution of earthquake ground motion. The other is based on the magnitude and propagation distance. In the energy distribution based method, a frequency band of energy concentration is defined as the basic clustered parameters. Ground motion records (7778 records) are collected and divided into 4 groups according to their site class. Then ground motion records belonging to the same site class are clustered into 3 groups based on the two cluster methods individually. The spectral characteristics of 12 groups of records derived by either cluster methods are analyzed and compared. It shows that the results of the two cluster methods are similar. The magnitude-distance based cluster method is proposed in this thesis. Thus, 12 groups of ground motion records belonging to different site types, with different magnitudes and propagation distances are derived.

The sample values of basic stochastic variables in physical based stochastic earthquake ground motion model for engineering purpose are identified using the ground motion records. Then the probability distribution parameters of the basic stochastic variables for each group are obtained through statistical analysis of identified sample values based on the above clustered ground motion records. Source and propagation parameters are analyzed based on magnitude-distance clustered groups. Site parameters are analyzed based on site classes. Thus, the quantitative probability distributions of basic stochastic parameters for different groups of earthquake ground motions are derived. The modeling of the basic stochastic parameters of the stochastic physical model of earthquake ground motions is established. Finally, a stochastic quantitative model of earthquake ground motions which takes into account of the influence of site type and magnitude, propagation distance is derived.

The phase properties of earthquake ground motions are studied. The theoretical relationship between duration and phase spectrum is derived. It shows that the duration of synthetic ground motion could be directly determined by the model phase spectrum. In this way, the superposition method of narrow band wave groups is improved and applied to simulate ground motions. Ground motion records of different site classes are re-generated using the improved method. Furthermore, the amplitude spectrum, phase difference distribution and time history of simulated ground motions are compared with those of records to validate the improved method and physical model.

Based on the quantitative modelling of stochastic model of earthquake ground motions for engineering purpose, the probability density evolution method (PDEM) is used to calculate the probability distribution and numeric attributes of the stochastic earthquake ground motions. The results of PDEM are compared with the statistical results of ground motion records to validate the quantitative model of stochastic earthquake ground motions. The detailed results of simulated ground motions of site II, group 2 are presented as an example in the thesis.

Four groups of ground motions which belong to different site types and different cluster groups are used for random seismic analysis of a five-story frame structure. The probability density of responses are investigated by virtue of PDEM. The failure probabilities of the structure subjected to different groups of ground motions are calculated by adopting the extreme value distribution based reliability estimation method. Comparative studies between the results of random seismic analysis

and those of the response spectral method are carried out. It indicates that the structure is probably not safe in earthquakes even though it meets the requirements of the code, which further shows the significance and necessity of the present study.

This study provides a basis for qualitative evaluation of the reliability of structures subjected to ground motions with different site classes, magnitudes, and propagation distances.

Key Words: cluster analysis of earthquake ground motions; physical model; stochastic simulation of earthquake ground motion; probability density evolution method; reliability of engineering structures.

目录

第 1 章 引言	错误!未定义书签。
1.1 概述	错误!未定义书签。
1.2 随机地震动的建模与模拟现状.....	错误!未定义书签。
1.2.1 地震学模型.....	错误!未定义书签。
1.2.2 工程地震动模拟.....	错误!未定义书签。
1.3 本文工作	错误!未定义书签。
1.3.1 本文的主要工作.....	错误!未定义书签。
1.3.2 本文的行文脉络.....	错误!未定义书签。
第 2 章 地震动记录的聚类分析	错误!未定义书签。
2.1 引言	错误!未定义书签。
2.2 聚类分析	错误!未定义书签。
2.2.1 聚类分析方法简介.....	错误!未定义书签。
2.2.2 K 均值聚类分析.....	错误!未定义书签。
2.3 地震动记录聚类分组.....	错误!未定义书签。
2.3.1 实测强震地震动数据.....	错误!未定义书签。
2.3.2 基于能量分布的地震动记录聚类.....	错误!未定义书签。
2.3.3 基于震级和传播距离的地震动记录聚类.....	错误!未定义书签。
2.4 地震动记录聚类分组的特征周期.....	错误!未定义书签。
2.4.1 设计反应谱及其特征周期.....	错误!未定义书签。
2.4.2 基于地震动记录聚类分析的特征周期计算结果.....	错误!未定义书签。
2.5 建议反应谱与规范反应谱的结构响应对比.....	错误!未定义书签。
2.5.1 结构地震响应分析的振型分解反应谱法.....	错误!未定义书签。
2.5.2 结构概况与有限元模型.....	错误!未定义书签。
2.5.3 地震反应分析结果与对比.....	错误!未定义书签。
2.6 本章小结	错误!未定义书签。
第 3 章 工程随机地震动的物理建模	错误!未定义书签。
3.1 引言	错误!未定义书签。

3.2 工程随机地震动的物理模型.....	错误!未定义书签。
3.2.1 地震震源模型.....	错误!未定义书签。
3.2.2 地震动传播途径的建模.....	错误!未定义书签。
3.2.3 地震动局部场地物理建模.....	错误!未定义书签。
3.2.4 地震动物理模型.....	错误!未定义书签。
3.3 工程随机地震动物理模型的参数识别与统计.....	错误!未定义书签。
3.3.1 工程随机地震动物理模型的参数识别.....	错误!未定义书签。
3.3.2 工程随机地震动物理模型的参数统计.....	错误!未定义书签。
3.4 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 4 章 工程随机地震动的模拟.....	错误!未定义书签。
4.1 引言.....	错误!未定义书签。
4.2 地震动相位的物理意义研究.....	错误!未定义书签。
4.2.1 相位及相位差的概率分布.....	错误!未定义书签。
4.2.2 相位的物理意义.....	错误!未定义书签。
4.3 基于相位谱的模拟地震动持时确定.....	错误!未定义书签。
4.4 地震动的窄带波群叠加模拟法.....	错误!未定义书签。
4.4.1 基本原理与公式.....	错误!未定义书签。
4.4.2 地震动时程模拟实例.....	错误!未定义书签。
4.6 本章小结.....	错误!未定义书签。
第 5 章 随机地震动物理模型的验证.....	错误!未定义书签。
5.1 引言.....	错误!未定义书签。
5.2 概率密度演化理论.....	错误!未定义书签。
5.2.1 广义概率密度演化方程的建立.....	错误!未定义书签。
5.2.2 广义概率密度演化方程的数值求解.....	错误!未定义书签。
5.3 基于 GF 偏差的选点方法.....	错误!未定义书签。
5.3.1 GF 偏差理论及扩展 Koksma-Hlawka 不等式.....	错误!未定义书签。
5.3.2 赋得概率的计算.....	错误!未定义书签。
5.3.3 基于 GF 偏差的点集确定方法.....	错误!未定义书签。
5.4 随机地震动的概率密度演化与模型的验证.....	错误!未定义书签。
5.4.1 随机地震动合成.....	错误!未定义书签。

5.4.2 随机地震动时程的验证.....	错误!未定义书签。
5.5 本章小结	错误!未定义书签。
第 6 章 工程应用	错误!未定义书签。
6.1 引言	错误!未定义书签。
6.2 结构概况与有限元模型.....	错误!未定义书签。
6.3 结构地震响应分析与可靠度评价.....	错误!未定义书签。
6.3.1 基于《抗规》的结构抗震分析.....	错误!未定义书签。
6.3.2 结构随机地震动响应分析与可靠度评价.....	错误!未定义书签。
6.4 本章小结	错误!未定义书签。
第 7 章 结论与展望	错误!未定义书签。
7.1 结论	错误!未定义书签。
7.2 展望	错误!未定义书签。
参考文献	错误!未定义书签。
附录 A 地震动记录背景资料.....	错误!未定义书签。
附录 B 工程随机地震动物理模型基本随机变量按照场地和聚类分组分别统计的均值和标准差	错误!未定义书签。
附录 C 工程随机地震动物理模型基本随机变量的概率分布..	错误!未定义书签。
附录 D 工程随机地震动物理模型基本随机变量选点	错误!未定义书签。
致谢	错误!未定义书签。
个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果	错误!未定义书签。