



申请同济大学工学博士学位论文

# 工程场地地震动相干函数 研究

(国家自然科学基金创新研究群体计划 编号: 50321803)

培养单位: 土木工程学院

一级学科: 土木工程

二级学科: 结构工程

研究生: 陈 原

指导教师: 李杰 教授

二〇〇五年六月



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

# **Numerical Analysis of Ground Motion Coherency Function of Engineering Sites**

(Supported by the Natural Science Foundation of China for  
Innovative Research Group, Grant No.50321803)

School/Department: School of Civil Engineering

Discipline: Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Candidate: Chen Yuan

Supervisor: Prof. Jie Li

**June, 2005**

## 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保留学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

-----

经指导教师同意，本学位论文属于保密，在 年解密后适用本授权书。

指导教师签名：

学位论文作者签名：

年 月 日

年 月 日

## 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

签名：

## 内容摘要

地震运动的空间变化对结构反应有重要影响，对于多个支座或延伸基础支承的超长结构，例如较长的房屋、大坝、隧道、桥梁等，考虑地震动的这种空间变化尤其重要。地震动的空间变化可用相干函数来进行描述。然而，由于地震动空间变化规律强烈地依赖于具体工程场地的工程地质条件，由密集地震台阵记录给出的统计地震动相干函数模型往往很难应用于不同的具体工程中。有基于此，本文从物理模拟出发、结合基岩地震动随机场的统计回归，对复杂工程场地的地震动相干函数进行分析。

为了有效的对复杂场地的地震动相干性进行分析，本文首先根据廖振鹏院士等提出的工程波动散射问题的分析方法，编制了确定性工程波动散射问题的计算程序，并采取了一系列措施以提高数值模拟过程中多次透射人工边界的稳定性和有效性。在上述工作基础上，通过引入随机振动虚拟激励方法，发展了一致及非一致激励条件下复杂工程场地地震动空间相干性的分析方法。通过对具体算例的分析，结果表明：在一致激励及仅由行波效应引起的非一致激励条件下，场地表面任意两点的迟滞相干函数总为1；在非一致激励条件下，复杂的场地条件使得场地表面的相干函数随距离和频率的变化而出现不规则变化，并在某些频段出现显著的相干损失。研究表明，局部场地效应对复杂场地的地震动空间相关性有重要影响。对于给定的两点，其迟滞相干函数随频率变化曲线的峰点或谷点与相应两点的谱比曲线的峰点或谷点存在近似对应关系，相干函数相角随频率变化曲线也有类似特点。

通过将随机结构分析的正交展开方法与上述随机激励下的波动分析方法相结合，本文发展了考虑场地介质随机性的场地地震动相干函数分析方法，并就介质随机性对相干函数的影响进行了分析。对具体算例的研究表明，场地介质的随机性对场地地震反应有重要影响，介质的随机性对加速度的影响大于对位移的影响。在一致激励作用下，当考虑介质的随机性时，水平成层场地表面两点的迟滞相干函数小于1，并在某些频段处出现相干性显著降低的不规则变化，这一不规则变化可用随机介质场地与确定性场地表面点的谱密度之比即随机影响因子来衡量。一般而言，在随机影响因子随频率变化曲线的峰值频段处，随机介质场地的地震动空间相干性有较明显的损失。

将考虑结构非线性性质的等效线性化方法与上述随机波动分析方法相结合，本文还发展了非线性场地的地震动相干函数分析方法，并就土的非线性特性对场地地震动相干函数的影响进行了分析。对非线性场地的研究表明，与线性场地的地震反应相比，非线性场地随机地震反应过程一般为窄带过程，场地反应振幅谱具有较低的峰值。在强烈的地震过程中，土的非线性特性改变了场地反应的谱过程，从而改变了场地两点谱比，使得场地的地震动相干性发生改变。当考虑介质的随机性时，土的非线性与介质的随机性产生耦合作用，在一定程度上增大了介质随机性对场地反应的影响，这一影响同样可导致地震动空间相干性的变化。本文最后研究了成层分布非线性随机介质场地在非一致激励下的地震动空间相关性，并研究了介质随机性对相干函数的影响，对该场地表面地震动相干性的不规则变化与场地随机影响因子的关系进行了讨论。

### [关键词]

地震动场，波动有限元分析，相干函数，虚拟激励方法，正交展开，随机介质，土的非线性，（非）一致激励。

## Abstract

With the development of the research on seismic ground motion, it has been widely recognized that the spatial variation of ground motions has an important effect on the response of lifelines such as bridges, pipelines, communication transmission system, etc. The variations in ground motion from point to point can be described by coherency function, The empirical coherency models are essentially event-, or mostly site-,specific, which often can't provide useful information for the analysis of extended structures. Based on wave motion theory and the coherency information of rock-site recordings , this study is focused on the physical simulation of the seismic ground field coherency function.

In order to incorporate the complex site condition in seismic ground motion coherency function, according to wave motion theories of scattering problem, the author develops a deterministic finite element seismic wave analysis computer program. Some measures are adopted in computation which greatly improve the stability and effectiveness of transmitting boundary in numerical simulation of wave motion. Base on above work , the principle of pseudo-excitation method is applied to computation zone of complex engineering sites, and the coherency function of wave observation points can be worked out using the deterministic finite wave analysis techniques. Some numerical examples are given to show the applicability of the methodology developed in this paper. The results indicate that the lagged coherency function is always equal to 1 when a deterministic engineering site is subjected to consistent excitation; For a site subjected to non-consistent excitation , the spatial incoherence of complex site does not show a strong dependence on separation and wave frequency, the chaotic behavior shows the effects of site conditions on the spatial incoherence of ground motions. The peaks and troughs of the lagged coherency between any given two observation points tend to correspond to the spectral ratio at the same two observation points ,so as to the phase spectrum.

With the introduction of the pseudo-excitation method and orthogonal expansion method of stochastic structural analysis into the wave finite element analysis, this paper develops a stochastic wave analysis method of complex site and the effect of random site media on the coherency function of the ground motion is studied. The results indicate that the randomness of the site media has important effect on seismic site response , the randomness has greater influence on the variation of accelerations than on displacements; For consistent input excitation, the lagged coherency of ground motions between any given two observation points is less than 1, although which tends to decrease with the increment of frequency, there are some drops at several frequencies, these drops are correspond to the peaks or troughs of stochastic factor, which defined as the ratio of the power spectra of site with random media and non-random media.

By incorporating equivalent linearization method into pre-work, the author also develops methods to evaluate the seismic response of nonlinear engineering site and the nonlinear effect of soil on the spatial incoherence of ground motion is studied. Compare to linear ground motion , the seismic response process of nonlinear site tend to be a narrow-band process and the power spectra has lower peak value; The nonlinearity of the soil changes the structure of power spectra of the studied engineering site, this leads to the variation of spectral ratio at observation points and eventually change the spatial incoherence of the site; The coupling of the nonlinearity and

the randomness of soil enhances the effect of randomness on the site response, which can also change the spatial coherence of ground motions. The spatial coherence of nonlinear site with random media subjected to non-consistent excitation is also studied.

**[Keywords]**

Seismic ground motion, Finite element wave analysis, Coherency function, Pseudo-excitation method, Orthogonal expansion, random media, Nonlinearity of soil, consistent (non-consistent) excitation.

## 目 录

<b>第一章 地震动场空间变化规律研究现状</b>	1
1.1 引言	1
1.2 地震动空间变化对工程结构的影响	1
1.3 地震动相干函数现有模型	3
1.4 地震动空间变化研究动向	9
1.5 本文工作内容	12
<b>第二章 复杂场地地震波动有限元分析</b>	14
2.1 引言	14
2.2 基于 MTF 的波动有限元分析	15
2.3 计算实例	25
2.4 本章小结	33
<b>第三章 复杂场地地震动相干函数数值分析</b>	34
3.1 引言	34
3.2 一致激励条件下工程场地地震动相干函数分析	36
3.3 非一致激励条件下工程场地地震动相干函数分析	45
3.4 本章小结	60
<b>第四章 场地介质随机性对相干函数的影响</b>	62
4.1 引言	62
4.2 考虑场地介质随机特性的无限域波动分析方法	62
4.3 场地介质随机特性对相干函数的影响	77
4.4 本章小结	82
<b>第五章 考虑场地介质非线性性质的工程场地地震动相干函数分析</b>	84
5.1 引言	84
5.2 非线性波动有限元分析	85
5.3 一致激励下非线性工程场地地震动相干函数分析	89
5.4 非一致激励下非线性工程场地地震动相干函数分析	99
5.5 本章小结	109
<b>第六章 非线性随机介质场地的相干函数分析</b>	111
6.1 引言	111
6.2 考虑非线性场地介质随机特性的无限域波动分析方法	111
6.3 一致激励条件下非线性随机介质场地地震动相干函数分析	116
6.4 非一致激励条件下非线性随机介质场地地震动相干函数分析	122
6.5 本章小结	125
<b>第七章 研究总结</b>	127
7.1 主要工作及成果	127
7.2 研究展望	129
<b>参考文献</b>	130
<b>致谢</b>	139
<b>攻读博士学位期间撰写的论文</b>	140