



申请同济大学博士学位论文

同濟大學

博 士 学 位 论 文

结构—地基动力相互作用体系的 振动台试验及计算模拟分析

(国家自然科学基金重点项目资助 项目编号: 59823002, 50025821)

博 士 生 李培振

导 师 吕西林 教授

申请学位级别 工学博士 专业名称 结构工程

学位授予单位和日期 _____

同济大学土木工程学院
结构工程与防灾研究所

2002年9月



同济大学申请博士学位论文

结构—地基动力相互作用体系的 振动台试验及计算模拟分析

(国家自然科学基金重点项目资助 项目编号: 59823002, 50025821)

博士生: 李培振

导 师: 吕西林 教授

专 业: 结构工程

同济大学土木工程学院
结构工程与防灾研究所

2002年9月

**A Dissertation Submitted to the Academic Committee
of Tongji University**

**Shaking Table Testing and Computer
Analysis on Dynamic
Soil-Structure Interaction System**

(Sponsored by Key Project of National Natural Science Foundation of China)

(Grant No. 59823002, 50025821)

**In Candidacy for
The Degree of Doctor of Philosophy in Structural Engineering**

by
Li Peizhen

Under the Supervision of
Prof. Lu Xilin

**Research Institute of Structure Engineering and Disaster Reduction
College of Civil Engineering
Tongji University, Shanghai, China
September 2002**

声 明

本人郑重声明：本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成博士学位论文“结构—地基动力相互作用体系的振动台试验及计算模拟分析”。除论文中已经注明引用的内容外，对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘 要

考虑结构-地基动力相互作用 (SSI) 对于正确预测软土地区的结构地震反应有非常重要的意义, 是当前地震工程研究领域里一个热点, 也是一个难点。本文采用振动台模型试验和数值计算方法研究了地震荷载下高层建筑结构-地基动力相互作用的有关规律, 并探讨了地基土液化对桩基高层建筑地震反应的影响。本文主要进行了以下一些工作:

(1) 在查阅大量国内外文献的基础上, 总结并简要评述了关于 SSI 的理论、试验分析方法, 概述了目前研究中还存在的一些问题。

(2) 进行了均匀土-箱基-单柱结构及分层土-箱基-高层框架结构动力相互作用体系振动台模型试验, 分析了主要试验现象以及主要试验结果和规律。试验中采用柔性盛土容器来减小土箱边界效应。

(3) 采用 ANSYS 程序对试验结果进行了验证, 分析表明所建立的三维有限元模型可较好的模拟振动台试验。计算中成功的将土体等效线性化模型并入 ANSYS 程序, 考虑了土体与结构交界面的接触效应, 合理的模拟了柔性容器, 考虑了重力的影响。计算得出的规律与试验结果基本一致, 主要有: ①箱基基础底面、侧面发生了土与基础接触面的脱离、滑移现象; ②土体的材料非线性对土体和上部结构的地震反应有较大影响, 而接触面效应对上部结构的地震反应有一些影响, 对土体基本没有影响; ③软土地基对地震动起滤波和隔震作用; ④在软土地基时, 考虑基础转动和平动十分必要; ⑤基础处的有效地震动输入比自由场地震动小; ⑥竖向地震动对相互作用体系动力反应规律没有明显的影响。

(4) 进行了高层建筑实际工程的结构-地基动力相互作用的计算分析。介绍了粘-弹性人工边界及其在 ANSYS 程序中的实现, 进行了有关的参数分析。参数分析表明: ①土体纵向边界取 5 倍结构纵向尺寸, 土体横向边界取 10 倍结构横向尺寸, 并在横向边界处施加粘-弹性人工边界, 可较好地模拟无限域土体; ②考虑相互作用后, 体系的频率比刚性地基时降低, 上部结构的位移反应增加, 而加速度反应、最大层间剪力、最大倾覆力矩均比刚性地基时减小; ③上部结构刚度、上部结构形式、地震激励、土性、基础埋深以及基础形式等参数对相互作用体系的动力特性和地震反应有较大的影响。

(5) 为了研究地基土液化时对桩基高层建筑体系地震反应的影响, 简要介绍了分时段等效线性有效应力动力分析方法, 且将其中的等效线性化方法改进为逐步叠代非线性方法, 并利用 ANSYS 程序参数化设计语言将这一分析方法并入 ANSYS 程序中, 最后分析了考虑液化时桩基-高层建筑体系的地震反应。认为对于单层砂土-桩基-高层建筑体系来说, 考虑砂土的液化对上部结构地震反应有较大的影响; 而对于本文采用的上海土-桩基-高层建筑体系来说, 砂土层的液化未对上部结构的地震反应产生明显的影响。

关键词: 结构-地基相互作用, 振动台试验, 均匀土, 分层土, 对照研究, 建模 ANSYS 程序, 计算分析, 有限元, 接触, 滑移, 粘-弹性边界, 有效应力

Abstract

It is of great importance to consider dynamic soil-structure interaction (SSI) for predicting the seismic response of structure in soft soil area. SSI is a hot and difficult research topic in the field of earthquake engineering. In the dissertation, shaking table tests and numerical calculation method were adopted to study the rules of dynamic soil-structure interaction under seismic loads.

Some main achievements of this dissertation are described as follows:

(1) Based on lots of literatures, analysis methods, test methods and existing questions of the study of SSI was summarized and commented.

(2) Shaking table model tests on homogeneous soil-box foundation-column interaction system and layered soil-box foundation-high-rise frame interaction system were implemented. Test phenomena and primary findings are analyzed. A flexible soil container was adopted to minimize the box effect.

(3) The test results are validated with ANSYS program. The simulation results show that the three-dimensional finite element model is proper for SSI problem. In the computational analysis, commonly used equivalent linearity model is chosen to consider the non-linearity of soil, and the changing-status non-linearity on soil-structure interface is considered by surface-to-surface contact element. The flexible soil container and influence of gravity are also simulated properly in the analysis. Conclusions drawn from computational results are coincident with test results approximately, such as: ① The separation and sliding phenomenon occur in both the side face and bottom of foundation. ② The computational analysis shows that great error will occur when the material non-linearity of soil is not considered in calculation of soft soil, and the changing-status non-linearity on soil-structure interface has some influence on the seismic response of structure. ③ Soft soil can filter and isolate vibration. ④ It is necessary to take the rocking and the swing into account in analysis when the foundation is in soft soil. ⑤ The foundation motion are changed and the motion of foundation is smaller than that of free field. ⑥ Vertical excitations have little effect on the responses of the dynamic soil-structure interaction system.

(4) The study on SSI of practical engineering is carried out in this dissertation. Viscous-Spring boundary is implemented in ANSYS program. Parameter analysis suggested that: ① Fivefold lengthways size of structure and tenfold transverse size of structure is chosen as soil size, and viscous-spring boundary is put on transverse boundary of soil. And this model could simulate the infinite soil effectively. ② When consider the SSI, the natural frequency of system decreases. The displacement response of superstructure increases, while the acceleration response, interstory shear amplitude and overturning moment amplitude decrease. ③ Parameters, such as the rigidity

of structure, structure style, excitation, soil property, buried depth and foundation type have great influence on the dynamic characteristics and seismic response of SSI system.

(5) In order to analysis the effect of the liquefaction of sand on the seismic response of the pile and the superstructure, the effective stress method of considering the soil as equivalent linear material in divided time intervals is introduced in this dissertation. And the method is realized in ANSYS program by using the APDL. Furthermore, the method of equivalent linearity is improved to the method of calculating nonlinearity step by step. The earthquake response of pile-high-rise building is analyzed. The liquefaction of sand has great effect on the seismic response of structure in sand-pile-structure interaction system, while the liquefaction of sand layer has little effect on the seismic response of structure in Shanghai soil-pile-structure interaction system.

Key words: soil-structure interaction, shaking table test, homogeneous soil, layered soil, comparison study, modeling, ANSYS program, computational analysis, finite element, contact, sliding, viscous-spring boundary, effective stress

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 引 言	1
1.2 研究现状	2
1.3 研究方法简介	3
1.3.1 理论方法	3
1.3.2 原型测试	7
1.3.3 室内试验	9
1.4 需进一步研究的问题	10
1.4.1 模型试验与原型观测问题	10
1.4.2 地基土的层状特性研究	10
1.4.3 地基土的非线性问题	11
1.4.4 地基土的材料阻尼机制	11
1.4.5 土 - 结构接触界面非线性的问题	11
1.4.6 人工边界的问题	12
1.4.7 多相介质模型问题	12
1.4.8 地震荷载的输入问题	12
1.4.9 计算模型和分析方法	13
1.5 考虑 SSI 的结构地震反应分析常用电算程序	13
1.5.1 CLASSI 程序	13
1.5.2 FLUSH 和 ALUSH 程序	13
1.5.3 SASSI 程序	14
1.5.4 HASSI 程序	14
1.5.5 通用有限元程序 ANSYS	14
1.6 本文的研究内容	14
第二章 土 - 箱基 - 结构动力相互作用	
体系振动台模型试验	16
2.1 引 言	16
2.2 试验目的及内容	16
2.3 试验装置	17
2.3.1 地震模拟振动台	17
2.3.2 土体边界模拟和试验容器的设计	17
2.4 试验模型设计	19
2.5 材料性能指标	21
2.5.1 模型土的性能指标	21
2.5.2 混凝土材性试验结果	22
2.5.3 钢筋材性试验结果	22
2.5.4 橡胶材性试验结果	22
2.6 测点布置及量测	25
2.7 加速度输入波的选择	26
2.8 试验加载制度	28

2.9 主要试验结果与规律.....	30
2.9.1 均匀土-箱基-结构相互作用体系振动台试验.....	30
2.9.2 分层土-箱基-结构相互作用体系振动台试验.....	34
2.10 本章小结.....	40
第三章 均匀土-箱基-结构动力相互作用	
体系振动台试验的计算分析.....	41
3.1 引言.....	41
3.2 建模方法和计算方法.....	41
3.2.1 建模方法.....	41
3.2.2 计算方法.....	48
3.3 计算模型的合理性.....	49
3.3.1 网格划分的合理性.....	50
3.3.2 考虑土体的材料非线性对计算结果的影响.....	50
3.3.3 考虑土体与结构接触界面上的状态非线性对计算结果的影响.....	51
3.3.4 计算与试验结果的比较.....	52
3.4 均匀土-箱基-结构体系试验的计算结果分析.....	53
3.4.1 基础滑移、脱离与基底接触压力分布.....	53
3.4.2 加速度峰值大小的分布.....	53
3.4.3 柱顶加速度反应组成分析.....	60
3.4.4 相互作用对基底地震动的影响.....	60
3.5 本章小结.....	62
第四章 分层土-箱基-结构动力相互作用	
体系振动台试验的计算分析.....	64
4.1 引言.....	64
4.2 建模方法和计算方法.....	64
4.2.1 自由度不协调的处理.....	64
4.3 计算模型的合理性.....	65
4.3.1 网格划分的合理性.....	65
4.3.2 考虑土体的材料非线性对计算结果的影响.....	66
4.3.3 考虑土体与结构接触界面上的状态非线性对计算结果的影响.....	68
4.3.4 计算与试验结果的比较.....	71
4.4 分层土-箱基-结构体系试验的计算结果分析.....	73
4.4.1 基础滑移、脱离与基底接触压力分布.....	73
4.4.2 加速度峰值大小的分布.....	76
4.4.3 结构顶层加速度反应组成分析.....	77
4.4.4 相互作用对基底地震动的影响.....	77
4.4.5 软土的滤波隔震作用.....	78
4.4.6 相互作用对结构动力反应的影响.....	78
4.4.7 竖向地震激励的影响.....	82
4.5 结构-地基相互作用体系地震反应的动画显示.....	87
4.6 本章小结.....	87
第五章 结构-地基动力相互作用	
体系的实例分析.....	91

5.1 引 言.....	91
5.2 工程概况.....	91
5.3 建模方法和计算方法.....	92
5.3.1 土体动力本构模型的选取.....	92
5.3.2 粘-弹性人工边界的施加.....	96
5.4 参数分析.....	99
5.4.1 土体计算区域的确定.....	99
5.4.2 上部结构刚度的影响.....	103
5.4.3 上部结构形式的影响.....	106
5.4.4 不同地震激励的影响.....	114
5.4.5 土性不同的影响.....	115
5.4.6 基础埋深的影响.....	119
5.4.7 基础形式的影响.....	122
5.5 本章小结.....	124
第六章 考虑地基土液化影响的桩基	
高层建筑体系地震反应分析.....	126
6.1 概述.....	126
6.2 逐步叠代非线性分析方法.....	127
6.3 有关的计算模型.....	128
6.3.1 桩基地震反应计算的简化假定.....	128
6.3.2 土的静力本构模型.....	129
6.3.3 土的动力本构模型.....	130
6.3.4 振动孔隙水压力增长模型.....	132
6.4 分时段逐步叠代非线性有效应力动力分析法的基本步骤.....	135
6.5 考虑液化的结构-地基动力相互作用体系地震反应分析.....	136
6.5.1 土体的地震反应分析.....	136
6.5.2 砂土-桩基-高层建筑体系的地震反应分析.....	137
6.5.3 上海地区典型建筑的地震反应分析.....	143
6.6 本章小结.....	144
第七章 结 语.....	145
参 考 文 献.....	149
作者在攻读博士学位期间发表的论文.....	157
致 谢.....	158

第一章 绪 论

1.1 引 言

地震作为一种重大的自然灾害,给人类带来的破坏不仅仅是房屋的倒塌、生命线工程的破坏,还有人员的伤亡,给人类社会造成巨大的损失。因此,研究建筑物在地震作用下的反应,以便在设计过程中提高建筑物的抗震性能,成为摆在工程科技人员面前的一个重要课题。

传统的分析方法假设地基为刚性,即不考虑结构和地基的动力相互作用。这种方法比较简单,但不符合实际情况。对于大型建筑,如高层建筑、核电站、海洋平台及大型水坝等类似工程,由于地基的柔性和无限性,使得按刚性地基假定计算出来的结构动力特性和动力反应与将地基和结构作为一个整体计算出来的结果有所不同。显然,由于结构和地基的振动和变形是相互联系的,它们之间必然存在相互作用。而且随着建筑物的高大,相互作用越来越明显。因此,有必要在抗震计算中考虑相互作用,加上现在计算手段越来越先进,也使考虑相互作用的抗震计算成为可能。所谓动力相互作用是指当建筑物受地震或其它形式的动载作用而振动时,上部结构的振动惯性力必然要通过基础传给地基,从而引起地基的振动和变形或使地基的振动和变形发生改变,而地基的振动和变形又反过来影响结构的振动和变形。

一般认为土和结构的动力相互作用主要表现在两个方面:(1)改变结构周围地基土的运动。由于结构的反馈作用将改变地基运动的频谱组成,使接近结构自振频率的成分得到加强;同时,地基的加速度幅值同无结构存在时(即所谓自由场运动)相比要小一些。(2)改变结构的动力特性。考虑地基的变形相当于认为体系刚度降低,所以基本周期要延长。此外,在考虑相互作用时,结构振动能量的一部分会通过地基传播出去而耗散掉。这相当于结构的阻尼增大,会使结构的振动位移有减小的趋势,但考虑地基的变形时基础的摆动又会使变形显著增大,引起 $P\sim\Delta$ 效应,故相互作用的最终结果要根据结构和地基的实际情况进行分析。地基和结构的动力相互作用已被许多震害现象所证实。如 1985 年墨西哥地震,墨西哥城中 6~19 层的建筑破坏严重,全部倒塌的房屋达 400 多幢。而墨西哥城距震中却很远,有 400 多公里。相反比墨西哥城离震源更近的地方的同样建筑物破坏却没有这么严重。原因主要是墨西哥城的地基属于高塑性软土,土与高层建筑组成的体系自振周期较大,频率较低,与远道而来的滤去了高频分量、低频分量占主导地位的地震波具备了共振条件。因此,在抗震计算中,应尽可能考虑地基和结构的动力相互作用问题。

《建筑抗震设计规范》(GBJ50011—2001)注意到相互作用的影响,并在抗震计算中得到部分考虑。如第 3.2.3 条、3.2.4 条和附录 A 把建筑工程的设计地震分为三组(相当于 89 规范设计近震和远震),可更好的体现震中距的影响;第 4 章中又根据土层的剪切波速对场地土进行了分类等等。不过《建筑抗震设计规范》对结构的抗震设计仍然采用反应谱法,对于一些重要的建筑物,仅仅按反应谱法进行抗震计算是不够的。这是由于直接用规范反应谱

不能很好地符合不同过程、不同地点的实际地震环境、场地条件及地基土特征，从而求解的地震荷载可能偏差较大。地震作用是一个时间过程，反应谱法得到的仅是地震过程中的最大惯性力值，但最大惯性力值的状态不一定是结构的最危险状态，因此单纯靠反应谱法有时不能找出结构真正的薄弱部位。为了全面反映结构在地震作用下的动力情况，应该采用考虑动力相互作用的时程分析法。时程分析是在地基土上作用地震波后通过动力计算方法直接求得上部结构反应的一种方法。由于时程分析法可以计算出整个地震过程中结构的运动和受力情况，因而可以得到结构最大的内力和最薄弱的部位。日本科学家曾用此法把结构的地震反应过程通过计算机显示出来，给人以直观的印象。但如果要使计算的结果反映真实情况，就必须在时程分析中考虑地基和结构的动力相互作用。

近三十年来，国内外就结构-地基相互作用对结构地震反应的影响已进行了多方面的研究，其中大量工作集中在理论研究与计算分析上。进入九十年代以来，日本、美国等国家开始进行现场振动试验和振动台试验，但由于各种条件限制，试验研究进行的相对较少，而计算分析与试验的对照研究则更少。对结构-地基动力相互作用问题进行试验研究，不仅可以为理论分析提供必要的参数，而且可以获得丰富的试验数据，为开展计算分析研究、验证其力学模型和计算方法的合理性奠定基础。对计算分析和试验研究进行对照研究，一方面可以验证计算模型的合理性，同时也能验证试验方案的可行性及试验结果的可靠性，具有非常重要的意义。因此，开展现场试验、振动台模型试验以及计算与试验的对照研究来验证理论研究成果就显得非常重要和迫切。

1.2 研究现状

土-结构动力相互作用的研究，最早源于 1936 年 Reissner^[1]关于弹性半空间表面刚性圆形基础振动问题的研究，之后又有 Quinlan 等对 Reissner 解的修正。进入 50 年代，Bycroft^[2]对圆形基础板的竖向、水平、摆动、扭转诸方面进行了全面的研究。进入 60 年代，土-结构动力相互作用引起了更多学者的关注，对各种类型的刚性基础板在不同方向上的振动问题进行了更详细的研究，其中比较有代表性的人物有 Arnold^[3]、Luco^[4]和 Lysmer^[5]等。其中值得一提的是 Lysmer^[5]提出的工程上应用比较方便的集中参数法。后来 Hall、Thomson 和 Luco 等人对这一方法进行了推广，Wolf 等^[6]又将这一方法推广到层状地基上。这一阶段奠定了土-结构动力相互作用的理论研究基础。

进入 70 年代后，由于数值计算理论和计算机技术的发展，以及一些重大工程的相继修建，推动了土-结构动力相互作用问题研究的迅速发展，使其进入了一个新的阶段。这一阶段在理论计算上以数值方法为主，有限差分法、有限元方法和边界元方法得到了较大的发展；除了整体分析法外，适用于各种情况的子结构分析方法纷纷被提出；各种近似的计算方法也得以发展。这一阶段场地条件对输入地震动影响的研究也得到很大的发展^[7-9]。

近年来，在继续进行各种理论探讨的同时，现场模型试验研究和对强震记录的分析研究^[10]也受到人们广泛的关注，成为土-结构动力相互作用研究的新一轮热点。

1.3 研究方法简介

结构—地基动力相互作用的研究方法可概括为理论方法、原型测试与室内试验三类^[11]，下面将分别叙述之。

1.3.1 理论方法

研究结构—地基动力相互作用的经典方法有解析法或集中参数法，数值法或解析—数值结合法则包括有限差分法、有限元法、有限条法、边界元法、离散元法、嫁接法、有限元线法、无限边界元法、无穷元法，以及上述各类方法之间、它们与解析方法之间的各类耦合方法。理论方法按结构的分析系统可分为整体分析法和子结构分析法两大类，按是否考虑孔隙水压力的影响又可分为总应力法和有效应力法，以下分别加以阐述。

1.3.1.1 解析法

对于简单结构和均质地基，可以通过解析方法求得精确解。在解析法中，其主要代表是弹性半空间理论和弹性波绕射理论。Reissner^[11]最早提出用弹性半空间理论分析地基与基础竖向激振情况下的理论解。这个理论被 Sung^[12]和 Bycroft^[2]分别发展用来处理不同类型的接触压力分布问题和不同类型的振动。Richart 和 Whitman^[13]用这一理论的分析结果与大量的场地试验相比较，结果表明，二者之间符合较好。弹性半空间理论对于在土质均匀、土层较厚的地基上建造的浅埋基础的建筑物结构的动力相互作用分析，无疑是简单有效且便于工程技术人员掌握使用的，但它也存在一定的缺点和局限性。Seed 等人^[14]认为，这种方法没有分析地基土的材料阻尼及辐射阻尼的影响；不适用于沉积层复杂的地基情况；不能考虑场地土动力特性随应变值的变化，计算出的地震反应值误差较大；不适用于基础埋深较大的结构物及不能考虑邻近结构物的影响等。对此，Hadjian^[15]和 Hall 等人^[16]提出不同的看法，他们列举一些资料表明，在大多数情况下用弹性半空间的集总参数法是足够精确的，地基土和结构的动力参数的变化照例可用集总参数法考虑。但是，应当承认，用弹性半空间理论定量地计算土—结构相互作用的问题仍然没有解决，由该理论得到的计算成果也并没有完全为现场实验所证实，现有的一些成果距解决实际问题仍有一定的距离。

弹性波绕射理论的优点是可以避开结构动力方程，直接由波动方程求解，但由于它在处理复杂边界条件时数学计算极其繁琐和困难，至今所见资料不多。

1.3.1.2 数值分析法

当上部结构、基础以及地形地质条件较复杂时，用解析法表示实际体系会产生大量数学上的困难，因而必须采用数值方法。

在数值方法中，有限元法是应用最广且最有效的方法。它可以较真实地模拟地基与结构的力学性能，处理各种复杂的几何形状和荷载，能够考虑结构周围土体变形及加速度沿土剖面的变化，适当地考虑土的非线性特点，可以计算邻近结构的影响。其次，由于有限元法通用性强，且已有大量可供使用的商业程序，易于为用户掌握，因而可以用于许多复杂的土与结构相互作用问题计算。在动力相互作用问题分析中，目前较为成熟的方法仍然是完全有限

元法,即对结构-基础-地基体系采用整体有限元分析。但完全有限元法在土和结构动力相互作用分析方面也存在比较明显的缺陷,突出的是为了反映地基的半无限域特征,不得不在相当大的范围内对地基进行离散化,因而占用计算机内存大,消耗机时多。为了减小求解区域,人们提出了各种人工边界,如 Lysmer^[17]提出的粘性边界, White^[18]提出的统一边界, Smith^[19]、Cundall^[20]提出的叠加边界, Lysmer 和 Wass^[21]提出的协调边界, Engquist^[22]与 Clayton^[23]提出的旁轴边界, 廖振鹏^[24-29]提出的暂态透射边界。在土与结构的动力相互作用方面,完全有限元法仍然存在计算过程复杂、计算费用较高的问题。因此,进一步研究有限元的求解方法,优化有限元程序结构,提高程序前后处理功能,仍是当前土-结构相互作用有限元分析中值得进一步研究的课题。

边界元法从本质上看属于一种半解析的数值方法,它依赖于各种问题的基本解或 Green 函数,这种基本解在复杂的介质条件下往往不存在,这一点有时会成为比较突出的问题。Dominguez^[30-31]首先将频域边界元法用于求解二维和三维表面式及嵌入式基础的动力刚度与波动响应。Karabalis 和 Beskos^[32]、Spyrakos 和 Beskos^[33]则分别用时域边界元法研究了上述问题,并考虑了基础板的柔度。边界元法用于成层介质的波动问题时,一种方法是直接采用均匀无限区域的基本解,采用分区解法,此时不仅需要离散区域的边界,而且需要对分层交界面进行离散,当层数较多时,工作量较大,只适合于分层数不多的情况,其优点是可以处理任意取向的分层界面,原则上适用于任意复杂分层介质中的波动问题。用边界元法处理成层介质波动问题的另一种方法是引入分层介质的基本解,采用分层介质模型,此时,边界元法在概念与方法上不会有任何困难,而关键的问题是寻找相应的动力基本解,但这种分层介质模型的基本解只对简单的水平成层半平面存在,它们一般具有较复杂的形式。自从 1904 年 Lamb^[34]对基本解问题研究以来,到目前为止,二维、三维刚性和弹性基岩上水平成层介质的频域基本解已分别由 Franssens^[35]、Luco 等^[36-37]、Bouchon^[38]、Kausel 等^[39]、Wolf 等^[40-41]以及 Tassoulas 等^[42]导出。在时域内,相应的基本解更不多见,曾三平等^[43]导出了任意层数层状弹性半空间轴对称动力问题时域基本解的解析表达式。这种水平成层介质模型的优点是可以将成层半空间介质作为一个整体来考虑,不需要对各层的交界面进行离散,但其基本解的形式较复杂,应用比较困难。以上的层状介质情况,实际上属于离散非均匀域,即局部域是均匀的,而整体是非均匀的。对于具有连续非均匀的介质,边界元法更多地依赖于基本解是否存在,这种基本解一般只对特殊的介质存在,对连续非均匀介质问题,边界元法一般只能用于研究特殊类型的非均匀介质。

无限元法以形函数形式描述从近域到远域位移幅值的衰减规律,以及不同波数的相位特征,本质上来说,也是一种人工边界。动力无限元由 Bettess 与 Zienkiewicz^[44]在静力无限元基础上发展起来,首先应用于流体波动分析,Chow 与 Smith^[45]将它应用于固体波的传播分析,Medina 等^[46]、Zhang 与 Zhao^[47]将这一方法用于结构-地基相互作用分析中。

离散元法是由 Cundall^[48]在七十年代初提出的一种分析不连续岩体变形的的方法,其假定岩体由互相切割的刚性块组成,单元间以虚拟弹簧接触传递相互作用力。从动力学牛顿第二定律出发,用显式动力松弛法进行叠代计算,可用于分析岩体的大变形与地下结构围岩的失

稳过程, 我国的王泳嘉^[49]、魏群^[50]、张楚汉和鲁军等^[51-52]分别对离散元法进行了有意义的开发和应用。离散元是一种岩土地基模型, 用于动力分析中需要将离散元与边界元相耦合, 以便反映无限地基的辐射阻尼, 这一耦合已由 Lemos^[53]、Dowding^[54]等完成了, 但目前还未广泛应用于结构—地基动力相互作用分析中。

有限差分法和有限元同属有限体模型, 为模拟地基的辐射阻尼需要在人工截断边界上施加透射边界或取足够大的地基离散范围。有限差分法曾用于地震地面运动分析, Alterman^[55]、Boore^[56]、Aki^[57]、Joyner^[58]等人的工作是典型的代表, 这一方法在地基动力分析中已有被有限元和边界元取代的趋势。

有限元—嫁接法是八十年代由 Dasgupta^[59]提出的, 其原理是在有限域模型中计入无限域的辐射条件, 从而使无限域的动力刚度可以用有限单体的动力刚度构成的微分方程来表示。这一方法适用于计算嵌入式基础的频域动力刚度。Wolf 和宋崇民^[60]将 Dasgupta 的一个单体推广到多个单体的模型, 极大地改善了嫁接法的精度。目前, 这种方法正处于研究过程中, 有可能广泛应用于结构—地基的动力相互作用分析中。

有限条法是由 Cheung^[61]提出的一种半解析方法, 基本思想是在结构或介质的一个方向上用离散单元数值方法, 另一个或两个方向上用解析法, 在结构—地基相互作用方面已有一定应用^[62]。此法对于规则成层地基的动力分析有一定优点, 但仍需截取很长的地基范围, 迄今仍未广泛应用于结构—无限地基的耦合分析中。

1.3.1.3 耦合法

耦合法是为了取各种方法之所长, 用两种不同方法结合起来求解所提出的问题。耦合法可以是解析法与数值方法的结合, 也可以是在部分域(例如近场)使用一种数值法(例如有限元), 而对于其它域(例如远场), 使用其它方法(例如边界元、半无限元、边界阻抗和半解析等)来模拟。在土—结构动力相互作用问题中, 研究得最多的是上面的后一种方法。主要是沿基础相邻土体中的某一规则的曲(折)线或曲面(如半圆、半球、矩形或棱柱等), 在该曲线(面)内(近场)由于为非均匀体, 一般都采用有限元来处理。严格地求解这类问题, 只对于扭转荷载条件才可得到解析解。远场用无限元模拟也是土—结构动力相互作用问题中研究得较多的一种方法。

远场用边界元与近场用有限元相结合来求解土—结构相互作用是近二十年来耦合法中用得最多的一种。最早实现频域内有限元与边界元耦合的是 Toki^[63]等。随后, Underwood 等^[64]、Mita 等^[65]、Kobayashi 等^[66]均采用二维频域方法进行耦合。Gaitanareos^[67]将耦合方法应用到三维问题中。Karabalis 等^[32]将这一耦合技术发展到时域方法中。Wolf^[40-41, 68]提出了将频域地基动力刚度转换为时域动力刚度的方法, 实现了频域和时域两大类方法的耦合。

1.3.1.4 子结构法

动力子结构法也是土与结构动力相互作用分析中广泛应用的一类方法。首先把整个结构划分为几个子结构, 分别对每个子结构进行分析, 最后再利用各子结构交界面处的变形连续条件把各子结构综合起来进行整体分析。最早将这一方法引入到土—结构相互作用分析中的

是 Chopra 等^[69]，他们利用弹性半空间动力刚度的形式，与有限元上部结构以及水坝的上游水域耦合起来发展了一整套子结构模态分析技术。自那时以来，出现了几种针对土-结构相互作用特点的动力子结构分析方法，如刚性边界元法，柔性边界元法和柔性体积法^[11]等。

按照模型的简繁程度，子结构法可以分为简单子结构法和一般子结构法。两种方法的基本概念及计算步骤一致，只是由于基本假定不同，故其计算工作量和范围不同。简单子结构法是将上部结构离散为由弹性杆串联的多个质点的悬臂子结构，将土体看作弹性半空间，基础则理想化为弹性表面上的无质量刚体。这种方法的计算工作量小，可用于分析建造在土质均匀、土层较厚的地基上且基础埋置深度不大的土-结构体系，但对于复杂的结构，不均质的地基以及有基础的结构，一般难以获得可靠的结果。一般子结构法将上部结构用有限元离散，地基根据场地土层条件，既可以作为连续的弹性或粘弹性半空间，也可以用有限元、边界元或其它数值方法离散。当用数值方法离散时可以考虑基础的柔性。一般子结构法能够用于分析埋入式结构，能考虑相邻结构通过土传来的相互作用影响及复杂地基情况，并能进行多点地震荷载输入。由于子结构法是将规定的自由场运动直接在结构-土交界面上输入，从而避免了反演计算和完全有限元中关于地震波类型和方向的有关假定，使问题处理起来更加方便一些。尽管一般子结构法也是将上部结构、基础和地基用有限元离散，但在计算上子结构法比完全有限元法简洁得多。

子结构法既可以在频域中应用，也可以在时域中应用，当在频域中应用时，只限于线性地基。如果要考虑土的非线性性质和结构的非线性时，就必须应用整体分析中的时域逐步积分方法。如时域有限元、时域边界元或它们之间的耦合法。关于这方面的研究仍处于初步阶段，其成果相对较少^[70-71]。

1.3.1.4 有效应力法

结构-地基相互作用体系的动力反应分析方法按是否考虑孔隙水压力的影响，可分为总应力动力分析法和有效应力动力分析法。在总应力动力分析法中，岩土介质的应力应变关系和强度参数都是根据总应力确定的，其动剪切模量 G 和阻尼比 D 只取决于震前的静力有效应力，不考虑动力荷载作用过程中孔隙水压力变化对土的性质影响。有效应力动力分析法与一般总应力动力分析法的不同之处在于该法在分析中考虑了振动孔隙水压力变化过程对土体动力特性的影响。

早期的有效应力动力分析法是在总应力法的基础上发展起来的。它以总应力法为基础，本构模型仍采用等价粘弹性体，但是在每一时段末增加了残余孔隙水压力或残余变形的计算。Finn 等^[72]最先提出用有效应力原理计算动荷载作用时水平地面下饱和砂层中孔隙水压力的一维有效应力分析方法。后来徐志英和沈珠江^[73]又提出地震液化的二维有效应力动力分析法，这种方法是在有限单元法的基础上，分时段将以 Boit 固结理论为基础的静力计算和以等效线性理论为基础的动力计算结合起来进行分析，其中考虑到了振动引起的孔隙水压力的增长、扩散和消散作用。徐志英和周健^[74]又将上述方法发展为三维有效应力动力分析。Lee、Finn 针对土的非线性滞回特性并利用 Masing 准则来模拟卸载和再加载过程，且考虑动荷载作用时瞬时和残余孔隙水压力的影响，提出增量弹性动力分析模型。同时，Mroz、

Dafalias、Paster 等学者从本构模型入手, 又由弹塑性分析的途径进一步发展了有效应力法, 它是采用复杂弹塑性计算模型的有效应力动力分析方法。这种方法在理论上更合理, 在实际上也更好地反映了土的真实性能。但计算工作量也更大, 目前尚未在实践中得到广泛应用。

与总应力法相比, 有效应力动力分析法不但提高了计算精度, 更加合理地考虑了动力作用过程中土动力性质的变化, 而且还可以预测动力作用过程中孔隙水压力的变化过程、土体液化及震陷的可能性和土层软化对地基自振周期及地面振动反应的影响等。但是由于目前对动力荷载作用时孔隙水压力的产生、扩散和消散机理及其预测方法还尚未达到可以完全信赖的程度, 有效应力分析中所需计算参数的确定还不是十分合理, 其计算工作量又相当大。因此为将有效应力法更加广泛地应用于实践工作中, 还需对其作进一步的探索和完善。

1.3.2 原型测试

土—结构动力相互作用分析研究的各种方法都或多或少包含一些假定, 有其局限性: 如关于地震动的输入、土性的模拟、土—结构体系的模型化以及运动方程的数值求解等。因此, 在将某一种方法用于实际之前, 检验其可靠性是十分必要的。现场模型或原型强迫振动试验与地震观测作为有效的分析方法, 受到了较为广泛的重视。

震害是最真实的“原型试验”结果, 震害调查所观测到的现象, 是研究土—结构动力相互作用问题的可靠方法, 往往能为重要理论的建立提供线索和实际数据。因此震害调查一直受到世界地震工程界的高度重视, 而震害调查数据亦正在不断积累之中。美国 Hamboldt 湾核电站是国际上第一个取得强震记录, 并最早将观测结果与计算进行对比的一座核电站。Celebi^[75-76]根据美国 1987 年 Whittier 地震, 对两个相距 16.3m 的钢排架结构强震观测数据进行分析。结构 A 采用桩长为 8.6m~11.6m 的钢筋混凝土桩基础, 纵横向第一自振频率均为 0.65Hz; 结构 B 采用箱基, 纵横向第一自振频率分别为 0.76Hz 和 0.83Hz。分析表明, 存在结构—地基—结构相互作用, 结构基底的地震动比自由场运动小。Sivanovic^[77]利用对位于洛杉矶市区一栋 7 层支承于摩擦桩上钢筋混凝土结构的旅馆从 1971 年到 1994 年长达 20 多年获得的 9 次地震观测资料进行分析, 可见土—结构相互作用十分明显, 主要表现为基础的摆动; 同时认为土的非线性行为是影响在强震下结构体系地震反应的重要因素, 由于土体的能量耗散作用, 对于上部结构而言这是有利的。Celebi 和 Safak^[78-79]对加州 Pacific Park Plaza (30 层, 桩筏基础) 根据 1989 年 Loma Prieta 地震观测结果进行了分析。Meli^[80]等对位于墨西哥城的一栋 14 层钢筋混凝土建筑进行了观测和分析。这些都极大地丰富了人们对结构—地基动力相互作用的认识。

现场模拟地震动试验, 从理论上说是比较理想的, 它能提供一种比较接近天然地震的环境, 能检验土—结构动力相互作用的各个环节。但是试验对象离振源较近, 波阵面和波的组成较复杂, 因此, 目前仍以稳态激振为主。

基础稳态强迫激振试验 (FVT) 的试验对象有两种: 一种是在现场浇铸的置于地表或部分埋入的混凝土或钢筋混凝土块体式基础; 另一种是按一定比例缩小的结构模型。实验目的在于测定土—结构动力相互作用体系的自振特性, 利用测量结果计算地基阻抗。由于 FVT