

土 - 结构动力相互作用的研究方法

范生海

(盐城工学院 材料工程学院, 江苏 盐城 224051)

摘要:介绍土 - 结构动力相互作用的研究现状, 对土 - 结构动力相互作用的研究方法进行了总结, 主要有理论分析法、模型试验法和原型测试法 3 种方法, 其中理论分析法是土 - 结构动力相互作用研究的基础, 包括子结构法和直接法; 提出了今后应进一步加强研究的几个方面。

关键词:土 - 结构动力相互作用; 理论分析法; 模型试验法; 原型测试法

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671 - 5322(2008)04 - 0064 - 04

土 - 结构动力相互作用问题的实质是研究地基土体对结构物动力反应的影响, 是结构动力学与土动力学的交叉学科, 一直引起结构工程师和岩土工程师的极大兴趣, 它的研究对象涉及大型地下结构、大跨度桥梁、大型水电站、高层建筑等与地基相连, 并在动力荷载作用下与地基有相互作用影响的各种结构体系。

土 - 结构动力相互作用有两方面的含义^[1]: 一是地基基础对上部结构体系的振动特性(包括自振周期阻尼和振动模态等)的影响; 二是上部结构对底部输入地震波的反馈作用。只有运用上部结构和地基基础共同作用理论, 才能真实反映结构的实际受力状态, 使结构设计更为经济合理。

1 研究现状

土 - 结构动力相互作用的研究可以追溯到 1904 年 Lamb 对弹性地基振动问题的分析^[2]; 1936 年, Reissner 通过对 Lamb 解的积分, 研究了弹性半空间表面刚性圆形基础板在竖向荷载作用下的振动问题, 开始了土 - 结构动力相互作用问题的真正研究^[3], 后又有 Quinlan 等对 Reissner 解的修正; 20 世纪 50 年代, Bycroft 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; 20 世纪 60 年代, Sandi、Lysmer、Newmark、Monge、Rosenberg、Hashiba 和 Whitman 等人作了很多关于土 - 结构动力相互作用效应的研究^[4]; 到 20 世纪 70 年代后期经过对各种分析方法优点

的争论, 关于土 - 结构动力相互作用的基本现象被广泛的理解和接受; 1985 年, 由 wolf J. P. zu 撰写的第一部关于土 - 结构动力相互作用问题的专著出版^[5-6], 该书具体阐述了关于土 - 结构动力相互作用效应问题的严谨而复杂的处理过程, 但所有方法都只局限于线性分析。近 20 年来, 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, 土 - 结构动力相互作用问题研究得到了迅速发展^[7-10]。

2 研究方法

土 - 结构动力相互作用研究方法大致可以分为 3 类: 理论分析法、模型试验法和原型测试法。其中理论分析是土 - 结构动力相互作用研究的基础; 模型试验主要是对地基土的物理力学性质的测量, 以确定理论分析模型的参数; 原型测试包括激振试验和强震观测两个方面, 近年来得到了一定的发展, 但在这方面的研究成果还不多。

2.1 理论分析法

理论分析法可以分为: 子结构法和直接法(见图 1)。

2.1.1 子结构法

子结构法在分析土 - 结构动力相互作用问题时是较常用的一种方法^[11]。它一般可分为两步解决, 第 1 步先分别求出上部结构、基础和地基的单体反应; 第 2 步再联合各单体反应使其满足相互作用的条件, 从而得到整体系统的动力反应。

收稿日期: 2008 - 07 - 11

作者简介: 范生海(1980 -), 男, 江苏盐城人, 助教, 硕士, 主要研究方向为交通土建材料。

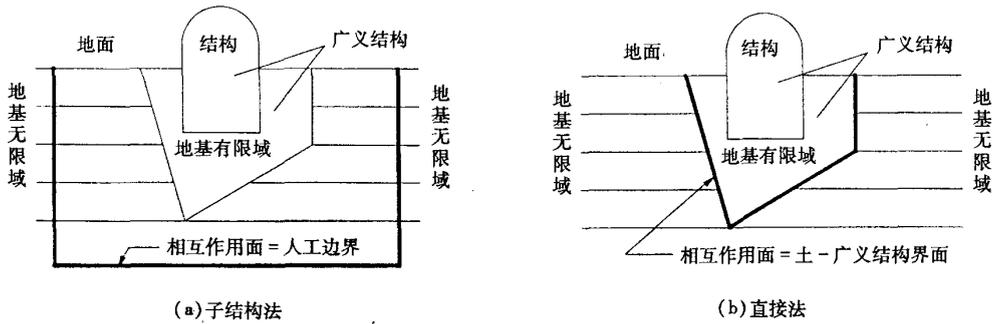


图1 土-结构动力相互作用分析的模型

Fig. 1 Analysis models of soil - structure dynamic interaction

采用子结构法分析土-结构动力相互作用,一般分3步进行^[12]: (1) 计算无质量刚性基础在给定输入振动或地震动下的反应,即运动相互作用;(2) 确定桩基(或地基)的动力阻抗,动力阻抗的确定是这一课题中最重要也是较为困难的问题之一,是子结构法的关键所在,因此子结构法也常被称为地基阻抗法;(3) 计算桩基等效弹簧和阻尼器支撑的结构在给定地震输入下的结构反应分析,即惯性相互作用。

按照分析方法的不同,子结构法可以分为频域分析和时域分析方法^[13]。但是现在大多数研究者进行土-结构动力分析时采用频域方法,原因有二^[14]: 第一,频域分析中可方便地考虑与频率相关的阻抗函数,将结构与土体分为两个子结构,分别研究其反应;第二,用有限元模型或者波传播理论得到的透射边界,都是频率的函数。但由于在频域中难处理非线性问题,同时不少工程技术人员不熟悉也不习惯频域中的动力分析方法。为此也有很多研究者发展了时域子结构方法,并提出了可用于时域分析的多种边界形式,如廖振鹏提出的透射边界、Smith提出的叠加边界等。

按照模型的繁简程度,子结构法可以分为简单子结构法和一般子结构法^[15]。两种方法的基本概念及计算步骤一致,区别在于对基础以及基础与土接触面之间的位移假设不同,故其计算工作量和范围不同。前者的数学模型是将上部结构离散化为由弹性杆联接的多个质点的悬臂结构,而土本身作为弹性半空间,基础则理想化为在弹性半空间表面上的一块无质量的刚性圆盘。而后者可以分析埋入式结构、相邻结构的影响及复杂地基情况等,基础不必假定为刚体,并可进行多点

地震荷载输入。

子结构法具有很大的灵活性,便于演算,在计算过程中可以得到中间结果,有助于加深对相互作用效应的理解,也有助于检验最终结果的精度。在进行分析时,可以大量减少数据的准备与输入、单元矩阵的计算与方程求解的工作量,这样占用的计算机内存小,使得该方法在工程抗震分析这一复杂课题中得到了广泛运用。

2.1.2 直接法

直接法^[1]就是对结构连同地基整体进行离散,用有限元方法进行分析,地震动输入基底视情况取在基岩面上或某一假想基底处。相互作用表面设在土介质中整个数值计算模型的人工边界处,波动辐射条件表现为人工边界条件。

直接法可以同时得到地基反应与结构反应。虽然表面上看不出地基、基础与结构之间相互作用的种种因素,但实际上计算过程中已考虑了相互作用的影响^[11]。计算时采用时域逐步积分可以考虑地基的非线性。直接法缺点是自由度多,计算量大,但随着计算机技术的迅速普及和发展,已得到了广泛的应用。目前只对简单边界条件与均匀介质求得了解析解答,一般情况下通常采用数值法或半解析数值法,主要包括:有限元法、边界元法、无限元法等^[2]。

(1) 有限元法:有限元法是当前最有力的数值分析工具^[12],不仅在理论上较成熟、完善,而且可以考虑影响桩基工作性能的主要因素,如土体的工作状态(塑性或液化等)、桩的特殊边界约束条件等。使用起来比较灵活方便,便于处理不规则场问题,在工程中得到了广泛地应用;但有限元法无法模拟无限地基的辐射阻尼,必须引入人工边界。人工边界的作用^[16]是保证来自广义结构

的外行散射波进入外部无限域。常用的人工边界有^[11]:粘滞阻尼边界、一致边界、旁轴边界、外推透射边界和迭加边界等等。从实际应用来看^[17],粘滞阻尼边界和一致边界已得到比较多的应用,其原因在于一致边界精度较高,而粘滞阻尼边界极为简单,且这两种边界条件都能方便地应用到有限元程序中。

(2)边界元法:边界元法^[16]是边界积分方程方法的离散形式,它自动满足远场的辐射条件,无需引入人工边界,处理无限边界问题十分简便,因此在土-结构动力相互作用分析中得到了广泛的应用。边界元法应用 Green 定理,通过基本解将支配物理现象的域内微分方程变换成边界上的积分方程,然后在边界上离散化进行数值求解^[18]。

(3)无限元法:无限元法是一种半解析半数值的方法,是在原来有限元基础上,将计算域边界处的单元沿外法线无限延伸而沿无限方向引入解析函数。

数值法或半解析数值法不只是上述提到的 3 种,还有其它方法,以及它们之间的相互组合,例如有限元-边界元法、有限元-无限元法等。

2.2 模型试验法

模型试验^[17]包括小比例尺模型的实验室试验和大比例尺模型的现场试验。小比例尺模型的实验室试验的优点是简便易行,条件易于控制等,但是由于其试验条件过于理想化,从分析方法的可靠性的验证来说,是有局限性的,其试验结果的可靠性往往会引起争议。所以采用大比例尺模型试验更接于实际。通过试验不仅可以分析相互作用的机理,而且可为理论分析方法提供重要的验证手段^[19]。但是大比例尺模型的现场试验需要花费大量的人力、物力和财力,所以一般只对重要的建筑物(如核电站等)进行试验,但由于地震的随机性,有目的的强震观测难以人为驾驭试验进度,等待周期往往很长。

关于土-结构动力相互作用的试验研究手段主要为大型振动台试验。吕西林等^[20]曾对软土地基上高层建筑进行振动台试验研究,对土-结构动力相互作用效应对上部结构动力反应的影响进行了模拟试验;范立础、王君杰等^[21]进行了桩-土-桥梁结构相互作用振动台试验研究;凌贤长等^[22]对液化场地上桩-土-桥梁结构动力相互作用进行了振动台试验研究;宰金珉、陈国兴等^[23]对考虑土-结构动力相互作用的 TMD 减震

特性进行了大型振动台模型试验和数值模拟对比研究,验证了软弱地基上 TMD 减震装置可能达不到预期的减震效果,甚至起负面效应影响的结论。

2.3 原型测试法

原型测试可用来验证结构-地基动力相互作用的理论模型^[24]。由于强震观测,特别是对自然地震波的观测不易测量,因此它与实际动力作用情况不易符合。在进行土-结构动力反应分析时,必须在考虑地基与基础相互作用的同时,还要考虑基础与上部结构的相互作用。而由于基础位移和结构位移的联系,这两者的相互作用是耦合的。所以,通过原型测试可以分析土-结构动力相互作用的动力特性和动力反应。

原型测试在抗震研究中起着相当重要的作用,它不仅可以获得真实的地震记录,而且可以通过埋设或安装在建筑物内的测量仪器得到建筑物的真实反应,由此可验证计算方法的正确性^[18]。1975 年美国 Ham boldt 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结果进行比较的一座核电站。松谷辉雄等对 1995 年 1 月 17 日发生在日本关西兵库县南部 7.2 级强烈地震中的一幢超高层钢筋混凝土建筑中的地震记录以及震害情况作了详细的报告。这些实测记录的不断积累推进了土-结构动力相互作用的研究,但是原型测试试验成本很高,至今试验很有限。

3 研究展望

随着大型地下结构、大跨度桥梁、大型水电站和高层建筑修建,土-结构动力相互作用问题越来越受到工程界和学术界的关注,目前对该问题的理论和试验研究都取得了重要进展,但是由于土-结构动力相互作用问题本身的复杂性,不同的计算方法都引进了一些假设和进行了不同程度的简化,以致不同方法给出的结构和地基反应存在有较大的差别。因此,土-结构动力相互作用目前的发展水平与工程实用之间仍存在相当大的差距。为此,今后应进一步加强以下几个方面的工作:(1)计算模型的深入研究;(2)土-结构动力相互作用的非线性分析研究;(3)大比例尺模型的现场试验和原型的强震观测;(4)参数和地震激励的随机性对土-结构动力相互作用的影响;(5)土-结构动力相互作用对地基稳定的影响;(6)土-结构动力相互作用对结构主、被动控制的影响。

参考文献:

- [1] 张冬茵. LS—DYNA 在土-结构动力相互作用中的应用[D]. 哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2003.
- [2] 窦立军,杨柏坡,刘光和. 土-结构动力相互作用几个实际应用问题[J]. 世界地震工程,1999,15(4):62-68.
- [3] Reissner E. Stationare axialsymmetrische durch eine Schuttelnde Masse erregte Schwingungen eines homogenen elastischen Halbraumes[J]. Ingenieur - Arch in, 1936,7(6):381-396.
- [4] Lysmer J, Kulemeyer R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. J. Eng. Mech. Div. ASCE,1969,95:759-877.
- [5] Wolf J P, Somanini. Approximate dynamic model of embedded foundation in time domain[J]. Earthq. Eng. Struc. Dyn., 1986,14:83-703.
- [6] Wolf J P. 土与结构的动力相互作用[M]. 吴世明,译. 北京:地震出版社,1989.
- [7] Ohtsuki A, Fukutake, K Sato M. Analytical and Centrifuge Studies of Pile Groups in Liquefiable Soil before and after Site Remediation[J]. Earthquake Engng Struct. Dyn, 1998,27(1):1-14.
- [8] Wilson D W. Observed seismic lateral resistance of liquefying sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2000,126(10):898-906.
- [9] Luco J E, de Barros F C P. Identification of structural and soil properties from vibration tests of the Hualien containment model[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2005,34(1):21-48.
- [10] Choi J S, Lee J S, Yun C B. Input and system identification of the Hualien soil-structure interaction system using earthquake response data[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 2003,32(13):1955-1975.
- [11] 张俊胜. 土-结构动力相互作用的研究方法和发展趋势[J]. 国外建材科技,2005,26(1):52-54.
- [12] 肖晓春,林皋,迟世春. 桩-土-结构动力相互作用的分析模型与方法[J]. 世界地震工程,2002,18(4):123-130.
- [13] 王凤霞,荆玉龙. 浅谈土与结构动力相互作用[J]. 低温建筑技术,2001,86(4):27-29.
- [14] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社,1988.
- [15] 王开顺,王有为,李林友. 土与结构相互作用地震反应研究及实用计算[J]. 建筑结构学报,1986(2):64-76.
- [16] 王智峰,王笃国,陈俊生. 大跨度桥梁地震响应研究现状与发展[J]. 西部探矿工程,2004,100(9):196-198.
- [17] 孙树民. 土-结构动力相互作用研究进展[J]. 中国海洋平台,2001,16(5-6):31-37.
- [18] 曹志远,张佑启. 半解析数值方法[M]. 北京:国防工业出版社,1992.
- [19] 吴世明,徐攸在. 土动力学现状与发展[J]. 岩土工程学报,1998,20(3):125-131.
- [20] 陈跃庆,吕西林,侯建国,等. 有建筑物存在的软土地基液化模拟地震振动台试验研究[J]. 武汉大学学报:工学版,2003(1):59-63.
- [21] 韦晓,范立础,王君杰. 考虑桩-土-桥梁结构相互作用振动台试验研究[J]. 土木工程学报,2002,35(4):91-97.
- [22] 凌贤长,王东升. 液化场地桩-土-桥梁结构动力相互作用振动台试验研究进展[J]. 地震工程与工程振动,2002,22(4):53-59.
- [23] 陈国兴,陈继华,王志华,等. 土-结构-TMD体系振动台模型试验与数值模拟对比研究[J]. 岩土工程学报,2003,25(5):532-537.

Research Methods for Soil - Structure Dynamic Interaction

FAN Sheng-hai

(School of Materials Engineering, Yancheng Institute of Technology, Jiangsu Yancheng 224051, China)

Abstract: In this paper, the research methods for soil-structure dynamic interaction are analyzed. There are theory analytic method, model test method and prototype test method. Theory analytic method includes substructure method and direct method, and is also the foundation for soil-structure dynamic interaction research. At last several research aspects which should be further strengthened are put forward.

Keywords: soil-structure dynamic interaction; theory analytic method; model test method; prototype test method

(责任编辑:沈建新;校对:范大和)