

文章编号: 1006-7329(1999)04-0112-05

· 综述 ·

土—结动力相互作用研究综述 (I)

——研究的历史、现状与展望

112-116

李 辉 赖 明 白绍良

(重庆建筑大学 建筑工程学院 400045)

TU435

摘 要 讨论了土—结动力相互作用的概念, 回顾了土—结动力相互作用的研究历史和现状, 总结了土—结动力相互作用体系分析方法, 介绍了国内外较著名的土—结动力相互作用典型试验。

关键词 土—结动力相互作用; 分析方法; 典型试验

中图法分类号 TU318

文献标识码 A

1 土—结动力相互作用的几个概念

地震时土体与结构的相互作用是一个普遍存在的问题, 最常见的是作为建筑物地基的土体与上部结构的相互作用。土—结动力相互作用[Soil—Structure (Dynamic) Interaction, 简称 SSI] 概念可由图 1 所示单质点系来说明。图 1 (a) 表示地震时基岩运动通过地基土层传播到底激起上部结构运动。如果地基土层较坚硬可作为刚体看待, 则土层内各点地震动与基岩的相同, 向上部结构输入的地震动与基岩地震动也相同, 在刚性地基假定下不存在地基土层与上部结构相互作用问题。图 1 相互作用概念说明事实上对地基土层作刚性假定与地基土层在时的实际工作状态并不相符。由于土体是一种变形体, 地震时土层内各点的地震反应的时程曲线与基岩地震运动的时程曲线有明显不同, 一是土层内各点的地震反应的最大值与基岩相应量的最大值不同, 这种现象叫做土体的放大作用, 对位移、速度、加速度通常以土层内各点的地震反应最大值与基岩地震动最大值之比来描述, 并冠以位移放大系数 D 、速度放大系数 V 、加速度放大系数 A , 放大系数一般大于 1, 某些情况下也小于 1; 二是土层内各点地震动所含的频率成分与基岩地震动的不同, 这一点既可从自由场地震反应分析的研究结论中看出来, 也可从世界各国地震观测台站获得的不同土层深度的地震记录 (Downhole) 的反应谱中看出。土层地震反应的计算简图可取成多质点体系, 求解该多质点体系的地震反应可确定出土层表面的地震动, 如果再在刚性地基假定下将该地震动作为上部结构的基底输入, 则这种处理方式的计算简图如图 1(c) 所示, 由于上部结构对地基土层的反作用没有包括进去, 虽然地基土层作为变形体被考虑了, 但是没有把地基土层与上部结构这两个事实上联结在一起的对象作为一个交联体系来考虑, 它们之间的相互作用不能完全考虑, 因此, 这种接力式的处理方法不能被认为考虑了地基土层与上部结构的相互作用。

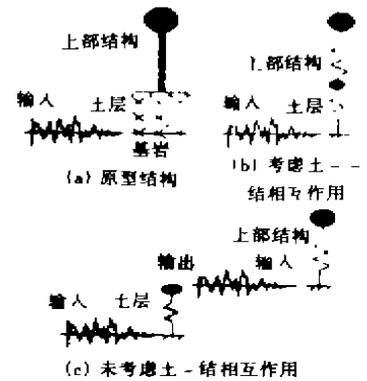


图 1 相互作用概念说明

收稿日期: 1998-09-14

作者简介: 李 辉 (1963-), 男, 四川人, 重庆建筑大学高级工程师, 主要从事结构抗震研究。

显然,图1(b)能够完全考虑地基土层与上部结构之间的相互作用。因为在这个体系中,将地基土层与上部结构作为一个整体来考虑了。

结构物与支承它的地基之间总是有相互作用的。根据荷载作用机制不同,土体与结构的相互作用有静力相互作用和动力相互作用的区别。如由上部结构—桩筏基—土构成的体系,考虑桩侧土的摩擦力、筏板底面土体的弹性支承力对抵抗竖向静荷载的贡献问题属静力相互作用问题。将建筑物及其基础假设为无质量时所得到的地震动输入与自由场的地震动输入的差别(称为运动相互作用, Kinematic Interaction)的研究;由于地基的柔性和地基的无限性造成在相同的地震动输入条件下,按建筑物—地基系统计算出的建筑物反应与刚性地基上建筑物的反应之间的差异(称为惯性相互作用, Inertial Interaction)的研究,属于动力相互作用问题。如图2所示。

对土—结动力相互作用问题的研究内容,不同的研究者有不同的看法。本文归结为以下七个方面问题:第一个方面问题是自由场地地震反应分析问题,包括已知基岩地震动如何计算地表及基岩面上覆盖土层内不同深度处的地震动问题、已知地表地震动如何计算基岩及基岩面上覆盖土层内不同深度处的地震动问题;第二个方面问题是建筑物基础的地震反应或地震动的散射问题;第三个方面问题是土—结动力相互作用体系建模问题;第四个方面问题是分析方法问题;第五个方面问题是土—结动力相互作用体系地震动输入问题;第六个方面问题是包括上部结构的地震反应分析问题;第七个方面问题是土—结动力相互作用研究成果的工程应用问题。

2 土—结动力相互作用研究的历史和现状

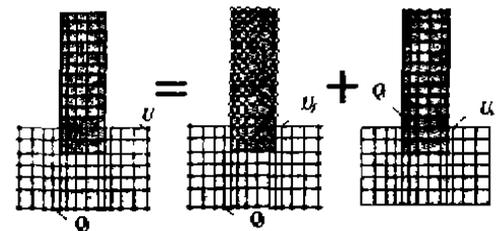
对土—结动力相互作用问题的研究,最早源于1936年 Reissner 关于弹性半空间表面刚性圆形基础振动问题的研究;到50年代,许多研究者获得了圆形和矩形基础在应力边值条件下的平移、旋转和扭转振动的瞬态和稳态解析解;到60年代中期,Paramelee 初步揭示了惯性动力相互作用的基本规律;由于在70年代以前关于土—结动力相互作用研究主要以机械基础作为研究对象,将基础简化为刚性无质量体系研究地基的动力阻抗特性,研究方法多以获得一定边值条件下的解析法为主;这一阶段是土—结动力相互作用研究的初级阶段。

70年代以后,动力相互作用的研究迅速发展,主要特点表现在以下几个方面:

1) 数值离散方法 有限差分法、有限元法、边界元法的应用,为各种复杂工程结构物考虑土—结动力相互作用分析提供了手段。有限元法便于处理不规则的场问题,而边界元法对无限边界问题的处理则十分方便。O. C. Zienkiewicz 等将两种方法综合应用的混合元法得到发展,使土—结动力相互作用的求解范围进一步拓展。利用数值离散方法可以处理包括基础形状、柔性、埋深、基础和地基间的翘离、地基分层、基础附近局部地形、地层分布的不规则性、土层的非线性特性、建筑物的塑性变形以及相邻建筑物的影响等问题。

2) 分析方法 包括频域分析和时域分析。在频域中可以较方便地考虑与频率有关的地基阻抗函数,将结构和地基分为两个子结构,分别研究其反应;用有限元或波的传播理论得到的透射边界,都是频域的函数,因此,大多数研究者都采用频域方法。但由于在频域中难于处理非线性问题,对时域分析方法的研究更为活跃,提出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、寂静边界、Smith 提出的叠加边界等。

3) 地震动的输入 考虑土—结动力相互作用效应的地震动输入有两大类问题。一是埋置式基



(a) 土—结动力相互作用 = (b) 自由场响应问题 + (c) 惯性相互作用问题

图2 土—结动力相互作用问题的叠加原理

础,包括桩箱(筏)基础,由于土层内各点的地震动的幅值及频率特性与由基岩或地表输入的地震动之间存在差异,使实际作用在埋入土层中的基础的不同位置的地震动不同。F.Y.cheng 对多点多向激励下的结构物进行了三维地震响应分析。一是对大跨结构和相邻结构,如桥梁、网壳等,除考虑地基对输入地震动的放大和滤波作用外,还要考虑地震波在空间和时间上的差异,姜析良等对相邻结构—地基—土考虑地面差动效应的多点输入问题进行了研究。

4) 近似计算方法 由于考虑土—结动力相互作用的计算工作量很大,许多研究者发展了简化的计算方法来近似地考虑土—结相互作用的影响。Penzien 所提出的混合模型属于这种类型。近二十年来,电子计算机技术的发展,为土—结动力相互作用问题的研究提供了强有力的计算分析的手段。

3 土—结动力相互作用的线性和非线性分析方法

土—结动力相互作用在分析方法上可以分为频域和时域,在结构划分上可以划分为全结构、子结构(连续、边界、体积)和混合结构。在 80 年代,大多数研究者采用频域方法。因为在频域分析中可以方便地考虑与频率有关的地基阻抗函数,将结构与土壤划分为两个子结构,分别研究其反应;透射边界是频率的函数;快速傅立叶变换(FFT)的出现,频域计算的障碍已不复存在。

对于线性体系来说,依叠加原理,其频域阻抗解与时域解是等价的。但对非线性体系,频域阻抗方法是不能求解的,此时,只有时域方法才可求解。土—结动力相互作用问题存在两种非线性效应,一种是由于土性的非线性引起的物理非线性;一种是由于基础与周围土体之间局部脱离接触所造成的几何非线性;频域阻抗方法对土—结动力相互作用体系非线性地震反应分析无能为力。研究土—结动力相互作用非线性地震反应分析问题只有借助时域方法才可以求解。

对土—结动力相互作用分析方法, Lysmer(1978)、Idriss and Kennedy(1980)、Luco(1982)、林皋(1991)、雄建国(1992)等作了较好的总结评述。

考虑土介质非线性的土—结动力相互作用分析,主要方法有完全有限元、近场采用非线性有限元而远场采用线性有限元的混合单元法以及时域中的子结构法(Wolf, 1986)。后两种方法隐含非线性主要发生在近场。这与等效线性化法中认为自由场运动中的非线性是主要的、土—结动力相互作用引起的非线性效应是次要的观点恰好相反。

在描述土的非线性时,较多采用的非线性模型有弹—塑性模型,如双线性模型、双曲线模型、多(双)屈服面模型、有效应力模型;等价非线性粘—弹性模型;给定恢复力特性表达式的模型,如 Hardin—Drnevich(1972)模型、Ramberg—Osgood(1973)模型等。

对土—结动力相互作用几何非线性问题的分析处理方法主要有以下三种:

有限元法 在土—结动力相互作用体系有限元分析模型中的土—结交界面处加设具有可反映滑移、脱离和粘合的非线性特性的界面单元。Ghabousi(1973)、Desai(1976)在 Goodman 等的岩石节理单元的基础上提出土—结动力相互作用分析的界面单元; Wolf(1977)、Isenberg 等(1987)和 Toki(1981)、赵振东与 Toki 等(1990)取得了在引入界面单元后的非线性有限元动力分析结果。

非线性 SR 模型 由于基础与土的有效接触面随时间不断变化,因此在 SR 模型中的弹簧刚度和阻尼是非线性的。雄建国通过取弹簧刚度和阻尼表达式中的土的剪切模量为有效接触比的函数来近似考虑土性的非线性发展了 SR 模型。

离散单元法 该方法于 1978 年由 Cundall 为分析岩体性状所提出。

4 土—结动力相互作用效应及试验验证

现有研究表明:土—结动力相互作用使体系峰值反应周期延长,并使之在土—结动力相互

作用体系的基本自振周期之前的整个周期范围内反应降低,这种降低对于上部楼层更为突出。这些结论已为不少实验和地震观测结果所证实。日本、美国和中国台湾等在这方面做了大量工作。

近年来,尽管土—结动力相互作用的分析研究取得了很大进展,但也应看到在关于土—结动力相互作用体系地震动的输入、土性的模拟、土—结动力相互作用体系的模型化、运动微分方程的数值解法等方面都包含一些假设,有其局限性。因此,对土—结动力相互作用研究成果作实际应用之前,通过实践的验证是必要的。

土—结动力相互作用分析方法的验证途径可分为三类:实验室内小比例模型试验;现场模型和原型的强迫稳态和模拟地震动的试验;常时脉动测量;强震观测。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—结动力相互作用的各种环节。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:一种是在现场浇筑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试验不涉及自由场地震反应、波的散射以及土的刚度退化等问题,这种试验主要用于测定土—结惯性相互作用。通过试验和理论的对比分析,得出的主要结论有:对硬场地,如土的分层及地基土阻尼选择恰当,土—结动力相互作用的理论分析能给出较满意的结果;对软场地和埋置基础,理论分析结果和试验结果差别较大,因为软土场地可能包含较强的土的非线性的影响;对埋置基础,水平振动和回转振动的耦合处理较表面基础复杂,回填土的影响也难于估计;对体系频率作出的预测比对阻抗函数的预测可靠得多;对辐射阻尼一般估计过高。

对房屋结构的激振试验,研究发现:在结构顶部激振时体系的频率较底层激振时体系的频率有所降低,但阻尼显著增大;室外地面激振时结构底层反应特征和底层激振时相同;对刚性基础,用S—R模型可以对土—结动力相互作用体系的自振特性与强迫振动反应作出较满意的预测,对柔性基础,则有必要使用更为细致的模型;对美国Hamboldt湾核电站厂房的地震观测,对日本福岛核电厂进行的一系列大比例尺模型试验、P.S.Theocaris等进行的小比例试验;这些试验结果表明:激振力增大,地基刚度要降低,体系自振频率要降低,但体系的阻尼、侧移及回转成分则没有明显变化;由波动方程解析解以及三维有限元解得到的地基阻抗函数,与强迫振动试验结果相比,一般而言,高频段理论值的实部(弹簧刚度)有偏低现象,虚部有偏高现象;有限元法得到的虚部都偏高;强震观测反应谱与计算结果非常一致。

中国台湾罗东大型土—结动力相互作用试验,为研究土—结动力相互作用对核电厂结构地震反应的影响,验证分析方法的可靠性,中国台湾电力公司(TPC)与美国电力研究所(EPRI)于80年代中期共同拟定了一项大比例尺结构抗震试验计划。参加该计划的单位包括美国、日本、瑞士和中国台湾共十三个单位100多位专家学者。结果表明:对FVT试验结果的预测,以Luco和Wong采用的ClaSSI、Bechtel用的SaSSI和土—弹簧模型最接近;S&L用DYNAX预测频率较高,原因在于采取了非常刚的埋置假设;Impell导出的剪切波速偏高,导致显著的频率高估;SuperAlush的结果可归因于阻抗函数的推导;对有限元模型和土模型刚性基底的处理;ClaSSI的结果较好可能有两点原因:对埋设特性和或埋设深度内的刚度作了近似处理。对反应的预测,Bechtel用的SaSSI求得的结果最好;接着依次为Luco和Wong采用的ClaSSI解、Bechtel用的SuperAlush/ClaSSI解与ClaSSI解。模型B确定以后,据此修改基础刚度,使之与试验频率相吻合;改变土的阻尼,使其与试验反应幅值相吻合。参加预测的模型方法,只要对土的分层、阻尼等作出合理的考虑,这些模型都是可用的。

日本大场1982年对高度在31m以下刚度较大的钢筋混凝土结构、劲性钢筋混凝土结构进行了常时脉动试验,考察不同地基条件和基础形式对建筑物基本自振周期的影响。测试结果表明:建筑物固有周期受地基性质、状态和形式的影响;带桩基结构比不带桩基的结构固有周期长;由地表至10米深处地基土层的平均 N 值与建筑物的固有周期间有较强的相关性;不论基础形式如何,随

着地基土层平均 N 值的减少,固有周期延长。

日本山道统计了 92 栋钢筋混凝土及劲性钢筋混凝土结构进行了常时脉动试验,提出:对钢筋混凝土结构,地下部分使固有周期延长;对劲性钢筋混凝土结构,地下部分使固有周期缩短。松下等根据 1968 年 7 月 1 日东松山地震记录,对东京都内 25 栋建筑进行考察,发现建筑物的基本周期较以前测得的基本周期延长 30% 左右;田中等对 17 栋建筑物进行了分析,得出建筑物的基本周期比微振测量时增加 20%、阻尼比增加 25% 的结论。阿部等对 200 栋建筑物在地震前后进行脉动测量,指出其基本自振周期平均延长 1.31 倍。

北京工业大学与美国国家地震工程研究中心合作,对地基—基础—上部结构动力相互作用问题展开了一系列研究工作。P. S. Theocaris 等进行了应力波在平面应变模型假设下的传播和应力场分布的试验研究。

目前,土—结动力相互作用研究中面临的最大问题是试验数据仍很缺乏,因而在土—结动力相互作用研究中存在很多不确定性,也限制了土—结动力相互作用研究成果的实际应用,制约了土—结动力相互作用研究工作的深入。

A Summary of Research on Soil – Structure Dynamic Interaction(I)

——History、Status in Quo and Prospects

Li Hui, LAI Ming, BAI Shao-liang

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing Jianzhu University, 400045, China)

Abstract This Paper discuss es the conception of Soil-Structure Dynamic Interaction (Abreviation SSDI). The history and status in quo of SSDI are reviewed. The analysis methods of interaction are summarized. Some famous tests at home and abroad are introduced.

Key Words soil-structure dynamic interaction; conception, analysis methods; typical tests