

相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用研究进展

高艳华¹, 宋俊磊², 潘旦光¹, 吴顺川¹

1. 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083
2. 核工业第五研究设计院, 郑州 450052

摘要 城市建设发展迅速, 高层建筑群逐渐增多, 相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用问题日益突出。提出了场地-结构群动力相互作用概念, 介绍了土-结构和结构-土-结构动力相互作用的研究历史; 从试验研究、力学模型、研究方法及研究成果等方面, 综述了相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用研究进展。

关键词 土-结构动力相互作用; 相邻建筑; 结构-土-结构动力相互作用; 地震反应

中图分类号 TU311.3

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.24.017

Research status and outlook of structure-soil-structure dynamic interaction in adjacent buildings

GAO Yanhua¹, SONG Junlei², PAN Danguang¹, WU Shunchuan¹

1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
2. The Fifth Research and Design Institute of Nuclear Industry, Zhengzhou 450052, China

Abstract With the rapid development of urban construction, high-rise building groups have been gradually increasing, so the structure-soil-structure dynamic interaction in adjacent buildings becomes an increasingly important problem. This paper discusses the significance of structure-soil-structure dynamic interaction research and puts forward the concept of site-structure groups dynamic interaction. It also gives a detailed review of the research development and status quo from aspects of experimental studies, mechanical models, research methods and results. Finally, future research problems are presented as an outlook, which may provide a reference for further studies.

Keywords soil-structure dynamic interaction; adjacent buildings; structure-soil-structure dynamic interaction; earthquake response

地震是人类面临的一大自然灾害。地震造成的直接灾害以及由直接灾害诱发的次生灾害, 给人类带来巨大的财产损失及人员伤亡。在地震作用下, 相邻建筑物之间通过地基土层联系在一起, 邻近建筑物的存在改变了建筑物周围的地面运动, 受邻近建筑物影响的建筑物动力特性与单体建筑物动力特性不同^[1-3], 因此, 相邻建筑物之间存在结构-土-结构动力相互作用, 尤其是邻近建筑物间距较小时, 这种相互作用

用是不容忽视的。

近年来, 随着世界经济及人口的发展, 城市快速发展, 城市建筑用地日益紧张, 高层建筑群逐渐增多, 相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用问题更加日益突出。

研究相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用有重要的理论意义和实用价值, 其研究意义在于:

- 1) 开展相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用研究对

收稿日期: 2015-09-02; 修回日期: 2015-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078032); 科技北京百名领军人才培养工程(Z151100000315014)

作者简介: 高艳华, 博士研究生, 研究方向为土-结构相互作用及岩体力学, 电子信箱: gaoyanhua200801@126.com。

引用格式: 高艳华, 宋俊磊, 潘旦光, 等. 相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(24): 106-113.

理解建筑物地震灾害、进行结构抗震安全性评价有理论意义和实用价值。

2) 土与处于城市环境中的诸多建筑物之间存在复杂的动力相互作用,定义这种作用为“场地-结构群”动力相互作用。研究相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用,为更多建筑物组成的结构群,甚至整个城市的场地-结构群动力相互作用研究提供基础性研究。

3) 研究相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用,可以更加清晰地了解新建一个或拆除一个建筑物对邻近建筑物地震动力特性的影响,为城市土地规划提供科学依据^[4]。

4) 目前,中国规范规定:地震烈度8度和9度,建造于III、IV类场地,采用箱基、刚性较大的筏基和桩箱联合基础的钢筋混凝土高层,当结构的基本周期处于特征周期1.2~5.0倍范围内时^[5],采用刚性地基假定下,水平地震剪力作用折减系数修正建筑物土-结构相互作用影响的方法,考虑单体建筑物土-结构相互作用,但规范没有考虑相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用。开展相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用研究,其研究成果将促进建筑结构抗震设计从单体建筑物,即“局部”,到相邻建筑甚至多个建筑物组成的建筑群,即“整体”,设计概念的变化。

1 土-结构动力相互作用

研究相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用首先要研究单体建筑物土-结构动力相互作用。通过单体建筑物的土-结构动力相互作用地震反应与存在相邻建筑物时其土-结构动力相互作用地震反应进行对比,可得出由于相邻建筑物存在,建筑物动力特性改变规律及由此导致的震害现象变化,从而更好地指导建筑物结构抗震设计。

1.1 发展历史

土-结构动力相互作用(soil-structure dynamic interaction, SSDI)最早在机械基础振动中受到重视,1936年Reissner^[6]首先得到弹性半空间表面圆形基础振动问题的解,随后各国学者对SSDI展开一系列研究工作。研究工作大体分为以下几个时期^[7-9]:

1) 20世纪初到60年代,主要研究内容为基于弹性半空间理论在频域内求解不同几何形状、不同埋置深度的基础阻抗函数,其目的是用阻抗函数代替均质半无限土体,从而得到采用子结构分析方法分析土-结构动力相互作用的模型^[10,11]。由于在频域内求解阻抗函数采用叠加原理,故这一时期SSDI研究成果主要适用于线弹性体系。

2) 20世纪70—80年代中期,SSDI计算方法多样化。SSDI计算方法可分为解析法、数值法、半解析半数值法3类,其中,解析法包括直接法、子结构法和集总参数法。对大多数工程问题来说,所涉及的材料和构件复杂、多样且不规则,很难甚至无法获得解析解,数值法和半解析半数值法,尤其是数值法用于计算非常必要。这一时期发展起来的数值法及

半解析半数值法包括:有限元法^[12]、边界元法^[13]、有限差分法^[14]等以及各种耦合方法^[15](有限元与边界元耦合法、边界元与无限边界元耦合法、有限元-嫁接法等)。

1985年Wolf撰写第一部土-结构动力相互作用专著,阐述直接法、子结构法、有限元及边界元等SSDI计算方法,详述离散体动力学原理、基本运动方程、结构和土数值模拟、波传播原理及自由场反应等研究内容^[16],此专著基本体现至20世纪80年代中期的SSDI研究成果。

3) 20世纪80年代后期至今,SSDI求解方法在时域内得到广泛发展,研究内容更加深入同时开展了大量试验研究。SSDI体系从线性过渡到非线性,从频域计算过渡到时域计算,在时域内求解的直接积分法得到广泛发展,例如:Wolf等^[17-19]提出基于时频变换的积分算法-脉冲反应法,并采用时域递归方法计算地基阻抗力;豆丽萍等^[20]采用直接积分法在时域内求解,研究土-结构动力相互作用。研究内容逐渐深入,俞载道等^[21]、职洪涛等^[22]采用分布参数法,研究单自由度和多自由度结构SSDI体系的基础提高和滑移对结构地震反应的影响;Borja等^[23]和徐磊等^[24]、Bycroft等^[25]和Miguel等^[26]、Shamsabadi^[27]和Sonji^[28]、Galal^[29]和刘洁平等^[30]、栾小兵^[31]等分别研究核电站、大坝、桥梁、高层建筑及空间网格结构等各种结构的SSDI。同时,SSDI试验研究也发展起来。

1.2 试验研究

近年来,随着试验技术的发展以及对SSDI的日益重视,SSDI试验研究得到了发展。SSDI试验研究包括室内试验和现场试验,研究成果如下:

在室内试验方面,吕西林等^[32-34]、楼梦麟等^[35,36]、陈跃庆^[37]及伍小平^[38]等,在同济大学土木工程防灾国家重点实验室从不同角度进行了一系列SSDI振动台模型试验,并获得了丰富的试验数据。

在现场试验方面,中国台湾罗东进行了大型SSDI试验^[39,40],为验证和比较不同SSDI计算模型及计算方法的合理性,此试验还组织了来自美国、瑞士、日本和台湾等13个研究单位进行SSDI计算分析,计算结果表明,计算参数取值合理时,大部分计算模型和计算方法可行。朱志辉^[41]设计实现了现场大比例(1:2)的土-箱基-框架结构实验模型,研究了不同激励方法下SSDI体系的动力特性,试验结果表明,不同激励方法SSDI体系的自振频率和阻尼不同。

1.3 SSDI对结构地震反应的影响

SSDI对结构地震反应影响有利与否不能一概而论。

曹晓岩等^[42]采用有限元法进行桩-土-结构相互作用地震反应分析,考虑相互作用后,上部结构的大部分截面内力减少了,但在某些部分截面处反而有所增大,文中算例增大幅度最大为27%,表明按刚性地基假定进行抗震分析计算并不总是偏于安全的;汪梦甫等^[43]应用子结构方法对天然地基上带刚性整体基础(箱型基础或筏板基础)的高层框架结构进行平面非线性地震反应分析时,得出基于刚性地基假定下的

非线性抗震验算并不一定都偏于安全;王满生等^[44]基于土层集总参数模型SSDI分析表明:对比较刚性的结构考虑SSDI可能存在一定有利因素,但对高层建筑SSDI导致结构在地震作用下的层间变形较大幅度增加,对结构抗震不利。

2 相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用

2.1 发展历史

相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用(structure-soil-structure dynamic interaction, SSSDI)研究始于20世纪60年代末。起初的研究主要是对置于弹性半空间的两个刚性圆形基础的结构-土-结构相互作用的研究,主要有1969年Mac-calden^[45]的试验研究,1971年Warburton等^[46]的理论分析。随后,1973年Luco等^[47]对两片平行的刚性基础的剪力墙在垂直方向输入SH波,进行了结构-土-结构相互作用的分析,分析表明:对低频情况及对邻近较大结构物的较小结构物来说,结构-土-结构相互作用影响是重要的;对于高频情况,忽略其他结构只考虑单体结构的土-结构相互作用是可行的。总体来讲,20世纪70年代,人们对相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用的认识还没有引起足够的重视。

从地震记录中得到的信息难以解释促使SSSDI发展较快。1985年建筑物密集的墨西哥城发生的地震持时长且在某些记录中出现类似拍的现象^[48],与采用传统计算方法得到的分析结果不符,这引起学者研究土与处于城市环境的建筑物,即多个相邻建筑物之间的结构-土-结构相互作用。同时期,1980—1987年间日本动力试验中心对福岛第一核电厂的1:5~1:5.4比例尺模型进行了系列试验,研究基础形式和埋深、土的非线性、相邻建筑物等对SSSDI体系动力特性及地震响应的影响^[49]。

1996年Wirgin等^[50]提出传播到建筑物的部分地震能量通过复杂的结构-土-结构动力相互作用在相邻建筑物上重新分布,这种现象被称之为“场地-城市相互作用”(site-city interaction, SCI)或者简称为“城市效应”(city effect, SE)。Francisco等^[51]对处于墨西哥市软土地基上两相邻建筑物进行横向及竖向脉冲观测试验,发现由于相邻建筑物存在修改了建筑物周围自由场运动。由此可见,相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用研究具有重要工程意义。

由于研究多个相邻建筑物结构-土-结构相互作用,要求更加复杂的数值计算模型同时消耗更多计算时间,因此,近年来才开展这方面的研究。例如Wirgin和Bard^[50],Tsogka和Wirgin^[52],Semblat等^[53]采用二维模型进行研究;Clouteau和Aubry^[54]采用三维模型进行研究。基于不同计算模型和不同计算方法的数值模拟证实了相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用的存在,但相互作用机制有待深入研究,研究成果也有待进一步试验验证。

2.2 力学模型

1) 二维模型。

Wirgin等^[50]建立具有周期性分布建筑物的二维模型,研

究软土地基建筑物的城市效应,如图1^[50]所示。图1中, L , B , H , h 分别为建筑物间距、宽度、高度和柔性地基的厚度。Tsogka等^[52]采用类似于图1的刚性基岩-软土层上10个间距和体积不等建筑物块体的二维理想城市模型,模拟地震长持时且出现类似拍的现象。

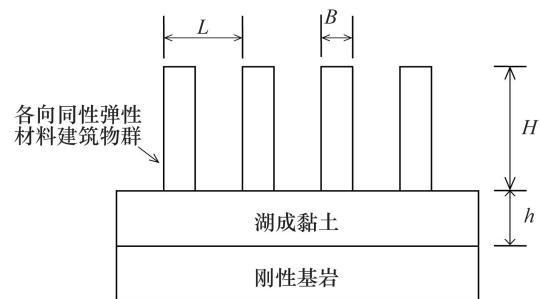


图1 周期性分布建筑物结构-土-结构动力相互作用模型
Fig. 1 SSSDI model with buildings in periodic distribution

姜忻良等^[2,3,55~57]采用图2所示的研究模型,对两个相同相邻建筑物在弹性范围内的结构-桩基-土动力相互作用进行一系列研究。图2中,A、B、C区为采用不同计算方法的区域。

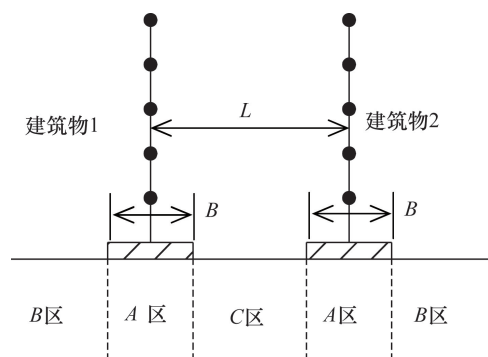


图2 两个相同相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用模型

Fig. 2 SSSDI model with the same two neighboring buildings

窦立军^[58]、雷艳等^[59]采用图3^[58,59]所示的研究模型进行两个不同高度相邻建筑结构-土-结构动力相互作用分析。图3中, L_n 为两个建筑物净距。

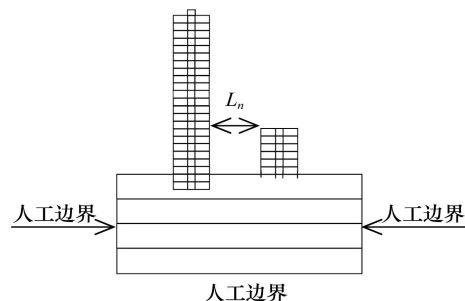


图3 两个不同的相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用模型
Fig. 3 SSSDI model with two different neighboring buildings

Ghergu 等^[61]采用5个带有刚性基础和建筑物顶部质量块的弹簧模型,且多个弹簧模型通过弹性半空间体相互作用,得出地震激励下建筑物群的集体地震反应,如图4所示。图4中, L 、 B 、 L_v 分别表示刚性基础净距、宽度及建筑物群刚性基础外围总宽度。Cárdenas 等^[61]和 Guéguen 等^[62]采用类似于图4的带有基础和建筑物顶部的两个质量块模型,考虑墨西哥相邻建筑物地震反应对自由场的有利影响,提出场地-城市效应的评价指标(建筑物与土的动能之比 E_{kb}/E_{ks})。

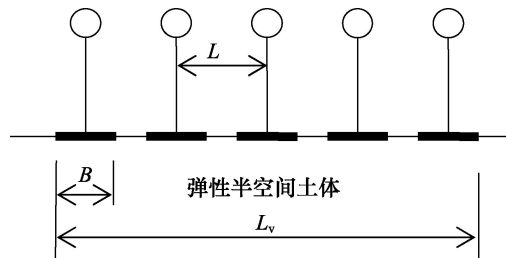


图4 带有基础和建筑物顶部质量块结构-土-结构动力相互作用模型

Fig. 4 SSSDI model with rigid foundation and the mass at the top of the building

另外, Boutin 等^[48]采用两种模型及方法得出评价城市效应的主要参数。(1)把6个建筑物简化为6个简单单摆,在土与建筑物之间设置平均阻抗的建立力学模型,采用平均表面加载近似的方法进行研究;(2)运用土-结构动力相互作用的圆锥波场模型建立表面边界层,采用考虑非均匀分布应力的表面边界层法进行研究。

2) 三维模型。

Clouteau 等^[54]建立层状弹性半空间上的三维建筑物模型,采用边界元方法,分建筑物周期性分布和随机性分布两种情况研究建筑物的存在是否有效改变地震动。

潘旦光等^[63,64]分别采用两种方法建立结构-土-结构三维模型。(1)采用等效单自由度体系上部结构与明置于等厚度均质水平土层上方刚性基础组成结构-土-结构动力相互作用体系,并运用有限元方法计算,研究结构-土-结构动力相互作用,如图5^[63]所示;(2)梁和柱采用梁单元,楼板采用壳

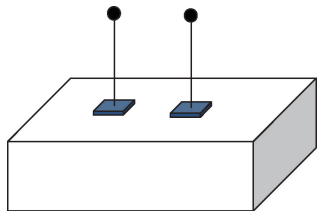


图5 土层上两个刚性基础单自由度结构-土-结构动力相互作用模型

Fig. 5 SSSDI model with the same two buildings composed of rigid foundation and single degree of freedom structure over soil layer

单元,土体实体单元,基础与土体无相对滑移,土体侧向人工边界为自由边界,底部采用固定边界,建立水平土层上两个钢框架结构的结构-土-结构相互作用有限元三维模型,并将数值计算结果和模型试验结构相对比,如图6所示。

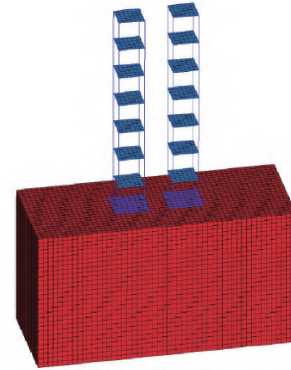


图6 水平土层上两个钢框架结构-土-结构动力相互作用模型

Fig. 6 SSSDI model with the same two steel frame structures over soil layer

2.3 研究方法

1) 有限元方法及其与其他方法的耦合方法。

姜忻良等^[2,3,55-57]采用样条有限元方法分析建筑物下有限区域(A区)与相邻建筑物之间有限区域(C区),采用半解析无限元法分析外围土体无限区域(B区),再通过边界条件连接刚性基础及位移协调条件对接各区域,并使用惯性耦合法得到结构-桩基-土体系动力方程。这是一种有限元与半解析无限元相耦合的方法,不仅计算工作量小,而且避免人工有限边界影响。

窦立军等^[58]、雷艳等^[59]应用波动理论,采用二维显式有限元方法。在垂直入射地震波作用下,对结构动力反应,传递函数幅值谱,结构基底等效输入反应谱,结构单元应力变化等进行详细研究。

潘旦光等^[63,64]将上部结构简化成单自由度体系以及上部结构采用几何相似常数 $C_L=1/50$ 的钢框架缩尺模型,土体为实体单元,结构与土体无滑移连接建立有限元模型,利用有限元方法计算结构-土-结构动力相互作用。

2) 边界元方法。

Karabalis^[65]在频域内采用边界元(BEM)法建立三维模型分析了黏弹性层状土介质上2个及3个相邻建筑物刚性基础间的基础-土-基础动力相互作用。Clouteau^[54]采用边界元方法分别按建筑物周期性分布和随机性分布两种情况,研究建筑物存在是否有效修改地震动。

3) 其他方法。

研究相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用的方法较多,除以上两类外还有其他的一些研究方法。Boutin 等^[48]采用平均表面加载的近似方法和考虑非均匀分布应力的表面边界层法。

2.4 研究成果

1) 两个相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用^[2,3,55-59,63,64]。

(1) 当相邻建筑物间距 L 不大于建筑物宽度 B 时,即: $L \leq B$,尤其是 $L \leq 0.5B$ 时,相邻建筑物之间的动力相互作用不容忽视,当 $L \geq 2.5B$ 时,相邻建筑物之间相互作用基本消失,即两个相邻建筑物间的相互影响,一般看来随着建筑物间距增大而减小。

(2) 建立在软土地基上的高耸建筑物改变地震动也改变了距离建筑物1 km内的相邻建筑物震动分布、振幅及时。

(3) 高层建筑对相邻多层建筑影响较大。

(4) 考虑了地面差动后,建筑物顶端最大位移、顶端弹性位移及基底剪力均要比未考虑时小,因此按不考虑地动差计算对实际工程是偏于安全。

(5) 在基岩输入地震动分析相邻结构相互作用时,可不考虑地震时程的相位差。在基岩处输入地震动,由于无限地基辐射阻尼的影响,会降低相邻结构相互作用的影响程度。

(6) 当建筑物间距导致不同建筑物的输入地震波有明显相位差时,结构-土-结构动力相互作用体系中存在两阶频率相近,相位相反的模态,这种现象被称为孪生频率,此时结构和邻近场地易于产生拍的现象。

(7) 结构与土体的频率比小于0.7时,即场地刚度较大的结构可忽略相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用影响。

(8) 对于长细比过大(结构高宽比 >2)或过小(结构高宽比 <0.4)的结构,结构动力特性由单一结构土-结构相互作用体系动力特性控制,可忽略相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用影响。

(9) 日本福岛第一核电厂模型SSSDI试验表明:相邻建筑物的存在,使体系的频率降低;模态方面,相邻建筑物的影响,使得水平振动和扭转振动、竖向振动和转动振动耦合;阻尼的变化与地震波的入射方向有关,可能减小也可能增大。

2) 多个相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用^[50-54,60-62]。

(1) 由于多个建筑物中平均地震动能量降低,因此,从整体来看城市效应似乎是有利的,但是城市效应增加地震动可变性,降低地震动空间相关性,在局部某些建筑物会产生较大的位移。

(2) 层状软土地基可以修改地震动,城市内部建筑物地震反应强烈的离散性取决于其邻近建筑物。

(3) 虽然多个建筑组成的城市整体上地震反应位移幅值比单体建筑物小,但由于长持时,其易损性比单体建筑物大。

(4) 城市内每个建筑物的累积地震反应都不相同,有些建筑物震害严重,而有些建筑物却几乎未受损失。

(5) 存在城市基频,且城市基频的大小不取决于组成城市建筑物的数量,而是取决于城市建筑物个体动力特性的不同。

3 研究存在的问题

经过40多年的研究,相邻建筑物结构-土-结构动力相互

作用已逐渐被认识和重视,取得了一些有意义的研究成果,但还存在需要进一步研究的问题,例如在试验研究、力学模型、计算方法、研究内容等方面应进行改进或补充。

1) 试验研究。

目前,单体建筑物土-结构动力相互作用试验研究较多,相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用实验研究很少,多个建筑物的城市效应试验研究更为罕见。试验研究中数值试验研究较多,物理试验较少,物理试验中室内试验研究较多,现场试验研究较少。

2) 力学模型。

目前,相邻建筑物结构-土-结构相互作用研究模型一般简化为二维模型,三维模型较少,研究范围主要在弹性范围,较少考虑非线性。

采用二维模型分析时,只能考虑一个方向地面加速度地震动,不能同时考虑不同方向的复杂地震动;只能考虑建筑物一个方向如宽度方向与相邻建筑距离的比值,而忽略了建筑物另一个方向的影响;一般结构物,除了刚度与质量完全对称,都存在着水平振动与扭转振动的耦合现象,因此,二维模型也无法分析结构扭转振动。

结构-土-结构动力相互作用体系为非线性体系,尤其是土材料非线性对地震波的传播及衰减影响较大,局限于弹性范围的研究不能真实地反映实际工程地震反应。

3) 研究方法。

以往相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用研究主要采用连续介质力学方法,例如:有限元法,边界元法,有限差分法等。连续介质力学方法受限于小变形问题求解,难以分析结构开裂、基础脱离等建筑物非线性地震响应。

4) 研究内容。

姜忻良等^[2,3,55-57]采用相邻建筑物间距与建筑物宽度的比值(L/B),确定相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用显著的范围。Wirgin等^[50]、窦立军等^[58]及雷艳等^[59]直接给出间距 L 的不同值对相邻建筑物地震反应的影响。

实际工程中,相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用显著的距离还与土阻尼特性,建筑物上部结构以及与之相邻建筑物的几何、材料特性及其动力特性等方面因素相关。因此,确定相邻建筑物结构-动力-结构动力相互作用显著的指标有待进一步研究。

4 展望

鉴于以上研究中存在的问题,就试验研究、力学模型、计算方法、研究内容等方面进行相应展望。

1) 相邻建筑结构-土-结构动力相互作用的试验研究逐渐深入,甚至研究多个结构群的城市效应的物理试验得到发展,且现场试验也取得进一步发展。

2) 力学模型更真实反映实际工程。进一步研究相邻建筑物结构-土-结相互作用问题,可采用三维模型,并考虑建筑物、土的材料非线性,以及建筑物基础与土接触面的几何

非线性因素。

3) 应用新的研究方法,并且根据具体研究问题研究方法多样化。例如:近年发展起来的离散元方法既可以模拟块体之间接触面滑移、分离与倾覆旋转,同时又能计算块体内部的变形和应力,特别适合于大型非线性方程动力问题的求解。因此,可采用三维离散元方法或离散元和有限差分法耦合合法等多种方法,进一步研究相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用。

4) 研究内容更充实,服务于实际工程。例如:相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用显著的距离可考虑更多影响因素,采用一个更加综合的无量纲指标来表征相邻建筑物结构-土-结构动力相互作用对建筑物地震反应的影响。

参考文献(References)

- [1] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京:地震出版社, 2006.
Hu Yuxian. Earthquake engineering[M]. Beijing: Seismological Press, 2006.
- [2] 姜忻良, 黄艳, 丁学成. 相邻建筑物-桩基-土相互作用[J]. 土木工程学报, 1995, 28(5): 32-38.
Jiang Xinliang, Huang Yan, Ding Xuecheng. The interaction of neighboring building-pile-soil[J]. China Civil Engineering Journal, 1995, 28(5): 32-38.
- [3] 姜忻良, 严宗达, 武志金. 相邻结构-地基-土相互作用的分支模态使用研究[J]. 地震工程与工程振动, 1998, 18(3): 8-13.
Jiang Xinliang, Yan Zongda, Wu Zhijin. Research on practical method of branched mode for neighboring structure-foundation-soil interaction system[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 1998, 18(3): 8-13.
- [4] Bard P Y, Chazelas J L, Guéguen Ph, et al. Site-city interaction[M]//Assessing and Managing Earthquake Risk. Netherlands: Springer 2006: 91-114.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010.
- [6] Reissner E. Stationäre axialsymmetrische durch eine schüttelnde masse erregte schwingungen eines homogenen elastischen halbraumes[J]. Ingenieur-Archiv, 1936, 7(6): 381-396.
- [7] 门玉明, 黄义. 土-结构动力相互作用问题的研究现状及展望[J]. 力学与实践, 2000, 22(4): 1-7.
Men Yuming, Huang Yi. A review on dynamic soil-structure interaction research[J]. Mechanics in Engineering, 2000, 22(4): 1-7.
- [8] 蒋建国, 周绪红, 邹银生, 等. 土-结构动力相互作用研究的发展历程及展望[J]. 岩土工程界, 2001, 4(6): 47-49.
Jiang Jianguo, Zhou Xuhong, Zou Yinsheng, et al. Development and prospect of soil-structure dynamic interaction[J]. Geotechnical Engineering World, 2001, 4(6): 47-49.
- [9] 彭潇. 基于土结构动力相互作用的多高层结构地震反应分析方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
Peng Xiao. Study on seismic response of multi-storey and high-rise structures analysis method based on soil-Structure dynamic interaction [D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [10] Lysmer J, Richart F E T. Dynamic response of footing to vertical loading [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1966, 92(1): 65-91.
- [11] Parmelee R A. Building-foundation interaction effects[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1967, 93(EM2): 131-152.
- [12] White W, Valliappan S, Lee I K. United boundary for finite dynamic models[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 1977, 103(EM5): 949-964.
- [13] Dominguez J, Roesset J M. Response of embedded foundations to travelling waves[J]. NASA STI/Recon Technical Report N, 1978, 79: 16141.
- [14] Joyner W B. A method for calculating nonlinear seismic response in two dimensions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65: 1337-1357.
- [15] 王满生. 考虑土-结构相互作用体系的参数识别和地展反应分析[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2005.
Wang Mansheng. Identification of system parameters and analysis of seismic response considering soil-structure dynamic interaction[D]. Beijing: China Earthquake Administration, 2005.
- [16] Wolf J P. Dynamic soil-structure interaction[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1985.
- [17] Wolf J P, Oberhuber P. Nonlinear soil-structure interaction analysis using dynamic stiffness or flexibility of soil in the time domain[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1985, 13: 195-212.
- [18] Wolf J P, Motosaka M. Recursive evaluation of interaction forces of unbounded soil in the time domain [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18(3): 345-363.
- [19] Wolf J P, Motosaka M. Recursive evaluation of interaction forces of unbounded soil in the time domain from dynamic stiffness coefficients in the frequency domain[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18(3): 365-376.
- [20] 豆丽萍, 潘旦光. SSSI作用下相邻结构的地震反应分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(增2): 411-412.
Dou Liping, Pan Danguang. Earthquake dynamic interaction of neighboring building in structure-soil-structure interaction[J]. Building Structure, 2013, 43(Suppl 2): 411-412.
- [21] 俞载道, 职洪涛, 曹国敖. 基础脱离、滑移对结构地震反应影响的探讨[J]. 同济大学学报, 1997, 25(2): 141-146.
Yu Zaidao, Zhi Hongtao, Cao Guoao. Study on the effects of base uplifting and sliding on earthquake responses of structures[J]. Journal of Tongji University, 1997, 25(2): 141-146.
- [22] 职洪涛, 俞载道, 曹国敖. 基础脱离、滑移对多层房屋地震反应影响分析[J]. 同济大学学报, 1998, 26(4): 367-371.
Zhi Hongtao, Yu Zaidao, Cao Guoao. Analysis of the effects of base uplifting and sliding on earthquake responses of multistory buildings [J]. Journal of Tongji University, 1998, 26(4): 367-371.
- [23] Borja R, Chao Y, Montáns J, et al. SSI effects on ground motion at Lotung LSST site[J]. Journal of geotechnical and Geo Environmental Engineering, 1999, 125(9): 760-770.
- [24] 徐磊, 陈国兴. 考虑 SSI 效应的核反应堆及地表地震反应[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 28-37.
Xu Lei, Chen Guoxing. Seismic responses of a reactor structure and its adjacent ground surface considering the soil-structure interaction

- effect[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2015, 35(1): 28-37.
- [25] Bycroft G N, Mork P N. The seismic response of dam with soil structure interaction[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1987, 113(9): 1420-1428.
- [26] Miguel C, Javier O. Seismic evaluation of concrete dams via continuum damage model[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1995, 24(9): 1225-1245.
- [27] Shamsabadi A. Three dimensional nonlinear seismic soil abutment foundation structure interaction analysis of the skewed bridges[D]. Los Angeles: University of Southern California, 2007.
- [28] Sonji B B. Influence of soil-structure interaction on the response of seismically isolated cable-stayed bridge[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(4): 245-257.
- [29] Galal K, Naimi M. Effect of soil conditions on the response of reinforced concrete tall structures to near fault earthquakes[J]. *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 2008, 17: 541-562.
- [30] 刘洁平, 张令心. 高层建筑土-结构相互作用地震反应分析简化评估方法[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(12): 28-34.
Liu Jieping, Zhang Lingxin. A simplified assessment method for seismic response analysis of soil-structure interaction of high-rise buildings[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(12): 28-34.
- [31] 栾小兵. 空间网格结构土-结构相互作用模型与地震反应研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
Luan Xiaobing. Soil-structure interaction model and seismic response of spatial latticed structure[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [32] 吕西林, 陈跃庆, 陈波, 等. 结构-地基动力相互作用体系的振动台模型试验研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2000, 20(4): 20-29.
Lü Xilin, Chen Yueqing, Chen Bo, et al. Shaking table testing of dynamic soil-structure interaction system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(4): 20-29.
- [33] Lü X L, Chen Y Q, Chen B, et al. Shaking table model test on dynamic soil-structure interaction system[J]. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 2002, 1(1): 55-64.
- [34] 吕西林, 陈跃庆. 高层建筑结构-地基动力相互作用效果的振动台试验对比研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2002, 22(2): 42-48.
Lü Xilin, Chen Yueqing. Study on effect of soil-structure interaction by shaking table test[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(2): 42-48.
- [35] 楼梦麟, 王文剑, 马恒春, 等. 土-桩-结构相互作用体系的振动台模型试验[J]. *同济大学学报*, 2001, 29(7): 763-769.
Lou Menglin, Wang Wenjian, Ma Hengchun, et al. Study on soil-pile-structure interaction system by shaking table model test[J]. *Journal of Tongji University*, 2001, 29(7): 763-769.
- [36] 楼梦麟, 宗刚, 牛伟星, 等. 土-桩-钢结构相互作用体系的振动台模型试验[J]. *地震工程与工程振动*, 2006, 26(5): 226-230.
Lou Menglin, Zonggang, Niu Weixing, et al. Shaking table model test of soil-pile-steel structure interaction system[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2006, 26(5): 226-230.
- [37] 陈跃庆, 吕西林, 李培振, 等. 不同土性的地基-结构动力相互作用振动台模型试验对比研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(5): 57-64.
Chen Yueqing, Lü Xilin, Li Peizheng, et al. Comparative study on the dynamic soil-structure interaction system with various soils by using shaking table model tests[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(5): 57-64.
- [38] 伍小平. 砂土-桩-结构相互作用振动台试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2002.
Wu Xiaoping. Study on soil-pile-structure interaction system by shaking table model test[D]. Shanghai: Tongji University, 2002.
- [39] Hadjian A H, Tseng W S, Chang C Y, et al. 谢君斐, 译. 罗东(台湾)土-结构相互作用大比例模型试验的启示(I)[J]. *世界地震工程*, 1993, 9(3): 41-52.
Hadjian A H, Tseng W S, Chang C Y, et al. Xie Junfei trans. The learning from the large scale Lotung soil-structure interaction experiments(I)[J]. *World Earthquake Engineering*, 1993, 9(3): 41-52.
- [40] Hadjian A H, Tseng W S, Chang C Y, et al. 罗东(台湾)土-结构相互作用大比例模型试验的启示(II)[J]. 谢君斐, 译. *世界地震工程*, 1993, 9(4): 49-59.
Hadjian A H, Tseng W S, Chang C Y, et al. The learning from the large scale Lotung soil-structure interaction experiments(II)[J]. Xie Junfei trans. *World Earthquake Engineering*, 1993, 9(4): 49-59.
- [41] 朱志辉. 土-箱基-框架结构动力相互作用的试验研究与理论分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
Zhu Zhihui. Theoretical analysis and test research on soil-box foundation-structure dynamic interaction system[D]. Changsha: Hunan University, 2006.
- [42] 曹晓岩, 李晓莉, 李立新, 等. 桩-土-结构相互作用地震反应分析[J]. *世界地震工程*, 2004, 20(1): 90-94.
Cao Xiaoyan, Li Xiaoyan, Li Lixin, et al. Seismic response analysis of the pile-soil-structure interaction[J]. *World Earthquake Engineering*, 2004, 20(1): 90-94.
- [43] 汪梦甫, 汪加武. 考虑土-结构相互作用高层框架结构非线性地震反应分析[J]. *湖南城市学院学报: 自然科学版*, 2004, 13(2): 1-4.
Wang Mengfu, Wang Jiawu. Nonlinear seismic response analysis for high-rise frame structure considering soil-structure interaction[J]. *Journal of Hunan City University: Natural Science*, 2004, 13(2): 1-4.
- [44] 王满生, 潘旦光, 周锡元. 基于土层集总参数模型的土-结构动力相互作用分析[J]. *北京科技大学学报*, 2007, 29(1): 5-10.
Wang Mansheng, Pan Danguang, Zhou Xiyuan. Soil-structure interaction analysis based on the soil lumped parameters model[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 29(1): 5-10.
- [45] Maccalden P. B. Transmission of steady-state vibrations between circular footings[D]. Los Angeles: University of California, 1969.
- [46] Warburton G B, Richardson J D, Webster J J. Forced vibrations of two masses on an elastic half-space[J]. *Journal of Applied Mechanics*, Transaction ASME, 1997, 38(1): 148-156.
- [47] Luco J E, Contesse L. Dynamic structure-soil-structure interaction[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1973, 63(4): 1289-1303.
- [48] Boutin C, Roussillon P. Assessment of the urbanization effect on seismic response[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2004, 94(1): 251-268.
- [49] 林皋. 土-结构动力相互作用[J]. *世界地震工程*, 1991(1): 4-21.
Lin Gao. Soil-structure dynamic interaction[J]. *World Earthquake Engineering*, 1991(1): 4-21.
- [50] Wirgin A, Bard P Y. Effects of buildings on the duration and amplitude of ground motion in Mexico city[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1996, 86: 914-920.
- [51] Francisio J, Chávez G, Cárdenas M. The contribution of the built environment to the 'free-field' ground motion in Mexico City[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2002, 22(9): 773-780.

- [52] Tsogka C, Wirgin A. Simulation of seismic response in an idealized city[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, 23: 391-402.
- [53] Semblat J F, Guéguen P, Kham M, et al. Site-city interaction at local and global scales[C]. *The Twelfth European Conference on Earthquake Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 2002, paper no.807.
- [54] Clouteau D, Aubry D. Modification of ground motion in dense urban areas[J]. *Journal of Computational Acoustics*, 2001, 9(4): 1659-1675.
- [55] 姜忻良, 严宗达, 李忠献. 多点输入的相邻结构-地基-土地震反应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(4): 65-71.
Jiang Xiliang, Yan Zongda, Li Zhongxiang. Analysis of earthquake response of neighboring buildings- foundation- soil system under multi-support excitations[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1997, 17(4): 65-71.
- [56] 姜忻良, 严宗达, 李忠献. 考虑地面差动的相邻结构-地基-土相互作用[J]. *地震工程与工程振动*, 1997, 17(2): 76-73.
Jiang Xiliang, Yan Zongda, Li Zhongxiang. Interaction of neighboring buildings- foundation- soil system in case of differentiation of earthquake ground motion[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 1997, 17(2): 76-73.
- [57] 姜忻良, 李忠献, 严宗达. 子域样条有限元与无限元耦合法分析相邻建筑物的相互作用[J]. *天津大学学报*, 1996, 29(6): 889-895.
Jiang Xiliang, Li Zhongxiang, Yan Zongda. The spline finite element and the infinite element analysis of interaction system for neighboring buildings[J]. *Journal of Tianjin University*, 1996, 29(6): 889-895.
- [58] 窦立军, 杨柏坡. 高层建筑与相邻多层建筑间的动力相互作用[J]. *地震工程与工程振动*, 2000, 20(3): 15-21.
Dou Lijun, Yan Baipo. Dynamic interaction of tall building with neighboring multi-storied building[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2000, 20(3): 15-21.
- [59] 雷艳, 窦立军, 成新宇. 高层与相邻多层建筑间动力相互作用的计算与分析[J]. *吉林建筑工程学院学报*, 2003, 20(1): 21-26.
Lei Yan, Dou Lijun, Cheng Xinyu. Calculation and comparison of the dynamic interaction of tall buildings and neighbor multistoried buildings [J]. *Journal of Jilin Architectural and Civil Engineering Institute*, 2003, 20(1): 21-26.
- [60] Ghergu M, Ionescu I R. Structure-soil-structure coupling in seismic excitation and city effect[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2009, 47: 342-354.
- [61] Cárdenas M, Bard Y, Guéguen P, et al. Soil-structure interaction in Mexico City. Wave field radiated away from Jalapa structure: Data and modelling[C/OL]. [2015-03-31]. <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/0385.pdf>.
- [62] Guéguen P, Bard P Y, Chávez-García F J. Site-city seismic interaction in Mexico City like environment: an analytic study[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2002, 92: 794-804.
- [63] 潘旦光, 豆丽萍. 两相邻建筑“结构-土-结构体系”的动力特性[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014, 36(3): 92-98.
Pan Danguang, Dou Liping. Dynamic characteristics of structure-soil-structure system for two neighbor buildings[J]. *Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering*, 2014, 36(3): 92-98.
- [64] 潘旦光, 高莉莉, 靳国豪, 等. 结构-土-结构体系动力特性的模型实验[J]. *北京科技大学学报*, 2014, 36(12): 1720-1728.
Pan Danguang, Gao Lili, Ge Guohao, et al. Model test of the dynamic characteristics of a structure-soil-structure system[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2014, 36(12): 1720-1728.
- [65] Karabalis D L, Mohammadi M. 3-D dynamic foundation-soil-foundation interaction on layered soil[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1998, 17: 139-152.

(责任编辑 刘志远)