

桩-土-结构相互作用研究综述及展望

朱守鹏, 刘齐茂

(广西工学院土木建筑系, 广西 柳州 545006)

摘要: 鉴于桩-土-结构相互作用对结构物的动力特性及地震响应的影响, 对国内外桩-土-结构相互作用研究历史和现状进行了总结。介绍了国内外桩-土-结构相互作用的四大类研究方法: 震害调查、数值方法、理论分析方法和试验方法, 并分析了各优缺点及存在的主要问题。最后指出接触面本构模型的完善、计算方法的改进、数值分析与试验相结合、震害调查和原型观测资料的收集、空间分析模型研究是桩-土-结构相互作用问题研究的发展方向。

关键词: 桩-土-结构相互作用; 数值方法; 理论分析; 非线性

中图分类号: TU447

文献标识码: A

引言

桩-土-结构相互作用(Pile-soil-structure-interaction, 简称PSSI)广泛存在于土木工程各个领域。由于桩-土-结构相互作用问题十分复杂, 涉及到土的动力特性、基础形状、上部结构体系以及动力反应等^[1], 因此这方面的研究也较为持久, 而且很难得出较为符合实际的成果。桩-土-结构相互作用研究对认识结构在动力荷载下的内在反应, 进而控制或利用这一反应具有举足轻重的作用, 因此这方面的研究具有较深远的研究意义及工程意义。

构筑物与支承它的地基之间总存在有相互作用。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之分。

静力相互作用分析是把上部结构、基础和地基三者看成一个整体, 利用它们在接触部位的变形协调条件来分析三者的内力和变形^[2]。

由震源出发, 通过场地土传播的地震波输入结构体系使其振动。这时, 结构体系产生的惯性力如同新的震源又反过来作用于场地, 引起新的地动再作用于结构体系。这种现象称为土-结构体系动力相互作用(Soil-Structure Interaction)^[3]。

1 桩-土-结构相互作用的研究历史与现状

1.1 二十世纪初到五十年代

土-结构相互作用研究最早可追溯到1904年Lamb对弹性地基振动问题的分析, 他讨论了弹性半平面与半

空间受动荷载作用下的波动问题, 得到了二维与三维弹性半空间上或半空间内作用点荷载时的稳态与瞬态解^[4]。1936年, Reissner通过对Lamb解的积分得到了刚性圆盘在竖直向振动时的稳态解, 奠定了土-结构相互作用研究的基础。T. KSung对Reissner的工作做了有益的补充, 他假定半空间表面上圆形刚性基础接触面内有三种反力分布(均匀分布、抛物线分布及刚性基础的压力分布), 给出了不同泊松比下的解, 并得出了半空间基础上条形基础反力的数学表达式, 该理论可以应用于计算条形基础的柔度函数。1947年, G. G. Meyerhof根据上部结构中任一点附近构件的变形协调关系, 提出估算框架结构等效刚度的公式来考虑相互作用, 即楼层等效刚度的近似计算公式^[5]。其后S. Chamecki通过荷载传递系数把上部结构刚度考虑到单独基础的沉降分析中去^[6]。

1.2 二十世纪五十年代到六十年代

该阶段的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来研究地基的动力阻抗特性, 从而建立振动力和位移的关系。研究方法多以求得一定边值条件下的解析法为主, 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^[7]。1956年Bycroft得到了弹性半空间表面刚性圆形基础板在平移和转动情况下的稳态解析解, Kobori在1962年以及Thomson在1963年得到了矩形基础的解。1957年, H. Grosshof着重研究了上部结构刚度对基底反力分布的影响^[8]。1967年, R. A. Paramellee首次针对土和结构系统提出了比较合理的力学模

收稿日期: 2011-03-03

作者简介: 朱守鹏(1987-), 男, 浙江温州人, 硕士生, 主要从事结构优化设计方面的研究。

型^[9],他将地基理想化为半无限空间,上部结构理想化为带刚性底板的单自由度刚架,其刚性底板搁置在地基土表面,该力学模型的提出,标志着土-结构相互作用的研究已经进入深化阶段。

1.3 二十世纪七十年代到八十年代

该阶段是土-结构相互作用计算方法的发展阶段。该阶段除应用解析方法继续深入地求解地基的动力阻抗之外,有限元法、边界元法和有限差分法等数值方法也进入了土-结构相互作用研究中,使得相互作用问题的研究范围大大拓宽。Chopra A K 和 Perumalswami P R 在分析大坝与基础在地震时的相互作用时提出了子结构法^[10],使数值计算能够在动力体系中以有效应用。Lysmer 和 Wass 于 1972 年提出了一种能够传播洛夫波和瑞利波的吸收边界,并将该边界应用于坐落在坚硬基岩及水平分层介质上的基础的频域动力分析^[11]。Kausel 将这一方法扩展到轴对称问题,并得出不同基础形式的阻抗函数^[12]。1976 年 Lueo 利用积分方法得出了粘弹性分层介质上刚性基础的阻抗函数^[13]。Dasgupta、Kameswara 和 Rao 把 Lysmer 的研究扩展到平面、轴对称及三维基础问题中,同时考虑了材料的非线性及非均质性^[14]。土与结构相互作用问题涉及到半空间无限域的问题,这就导致边界元法的出现。1978 年 Dominguez 首次利用频域中边界元法得出明置或埋置于粘弹性半空间中的矩形基础的阻抗函数^[15]。1980 年,Pekefis 和王贻荪等人对基础振动半空间理论作了进一步分析,求得了动 Boussinesq 问题的精确解^[16]。1981 年,Iguchi 和 Luco 得出了弹性半空间上矩形基础的动力反应^[17]。

1.4 二十世纪八十年代中期以后

该阶段是土-结构相互作用研究的进一步深化阶段。这一时期相互作用向两个重要的方向发展:(1)日本、美国等国家开始进行大规模的模型试验和现场振动试验,通过试验获得必要的实际数据以检验各种计算模型的可靠性,研究各种因素对相互作用的影响,研究相互作用的效果^[18-22]。(2)随着计算机科学技术的发展,电子计算技术提供了有力的分析计算手段,对时域分析方法的研究更为活跃,使相互作用研究从线性问题扩展到非线性问题。1985 年,Abascal 和 Dominguez 利用 FEM-BEM 方法求得了柔性基础的动力反应,并在 1986 年求得基础置于分层非均质土体上的阻抗函数。Karabalis 和 Beskos 以及 Gaitanaros 和 Karabalis 在时域中利用 BEM-FEM 分析得出了埋置基础的动力反应。Ahmad 和 Banerjel 利用频域中的二次单元求得基础的柔度函数,并利用边界元求得柔性埋置基础的动力反应^[23]。1994 年,Wolf 和 Song 提出了微分有限元核方法,并用于求解时域内无限介质的动态刚度矩阵。1997 年,Han 提出非线性土中桩的动力反应。1998 年,Bemal 和 Yousef 提出了非线性土中结构共同作用的时域频域混合法^[24]。职洪涛、俞载道和曹国敖应用参数分布法,对基础产生脱离和滑移的土-结构相互作用进行了分析。

2 桩-土-结构相互作用效应

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;由于将地基与结构作为一个体系进行分析,使得输入地震动的特性与刚性地基假定的也有所不同,这些差别就是由土-结构相互作用引起的。

桩-土-结构相互作用效应主要表现在:(1)由于地基的柔性,使得结构的基本周期延长,一般可延长 10% - 150%^[25]。(2)在地震作用下柔性地基上结构的振动能量有一大部分通过波的辐射和土本身的滞回作用逸散到地基介质中。考虑相互作用时,结构阻尼有所减少,但由于土的参与,地基土的阻尼补偿了结构阻尼的减少,使结构-地基相互作用体系的阻尼比刚性地基上结构阻尼比(即不考虑相互作用时)有所增大^[26]。(3)大部分基底剪力是减小的,但也有一部分是增大的。因此不能简单地认为按传统的刚性地基假定计算出来的地震作用进行抗震设计总是偏于安全的^[27]。(4)与自由场地相比较,由于上部结构的振动反馈作用,改变了地基运动的频谱组成,使接近结构自振频率的分量获得加强。同时,地基的加速度幅值也较邻近自由场地减少,文献^[28]指出,减少可达到 20% - 63%。(5)由于结构-地基的相互作用效应,结构基础处加速度最大峰值与其邻近自由地表相比有所减少,所以一般说来在地震动作用下考虑相互作用后的弯矩和剪力通常减少,而位移由基础平移、转动及结构本身变形组成,比不考虑相互作用时大。然而,不同文献针对不同的计算对象和地基条件、基于不同的计算模型,得出的结论也不尽相同。

3 桩-土-结构相互作用研究方法

桩-土-结构相互作用的研究方法^[29]可总结为以下 4 种:(1)震害调查;(2)试验研究;(3)理论分析方法;(4)数值方法。国内林皋^[30]、梁青槐^[31]、窦立军^[32]等对土-结构动力相互作用进行了较为系统的总结。

3.1 震害调查

通过震害调查可以充分了解土体、桩基和结构在地震作用下的动力响应。对震害及其产生原因的分析可以了解桩基破坏机制,初步掌握桩-土-结构相互作用机制,指导以后的桩基抗震设计。

3.2 试验研究

虽然土-结构动力相互作用在理论分析和计算方法方面取得了比较大的进展,但不同的计算方法均有一定的假定和不同程度的简化,有其局限性。因此常采用试验方法来进行检验,另通过试验可得到一些理论分析中不能发现的现象。

近年来进行了一系列的现场试验和模型试验研究,主要可分为现场试验和地震观测、离心机模型试验和振动台试验等。有关试验模拟的方法和成果在文献^[33-39]中均有评述。

3.3 理论分析方法

理论分析方法中应用最广的是动力文克尔地基梁法,此外还有弹性地基梁法和弹性连续体法等。

(1) 动力文克尔地基梁法(Dynamic Beam-on-Winkler-Foundation)。基于文克尔地基假设,每一层土的反应与相邻土层无关,采用梁模拟桩,离散的弹簧系统模拟桩土相互作用。尽管这个假设忽略了土层之间的剪力传递,仍然被证明对于桩的横向静力和动力反应分析是一种行之有效的方法。在土-桩接触处离散成一系列的点,用弹簧和阻尼器组合代表每层土-桩相互作用的刚度和阻尼。土-桩弹簧为线弹性或非线弹性,通常用来模拟非线性土-桩刚度的 $p-y$ 曲线可由现场实验结果推导。采用 Winkler 地基梁法,还可以考虑土-桩之间的裂缝、土刚度的循环退化等。但是由于它对土-桩接触面进行了二维简化,径向和相互作用的三维分量被忽略了。Nogami(1991)认为在桩基础动力反应分析的几种土-桩相互作用模型中,以 Winkler 模型最为简单、计算最为有效^[40]。

(2) 弹性地基梁法(Beam-on-Elastic-Foundation)。Herenyi(1946)最早给出四阶微分方程形式的弹性地基梁解。这是针对弹性连续介质的方法,对于任意分布的土或桩刚度的解析解很难得到。这种方法主要用于对横向加载的桩的静力问题,在 PSSI 分析中可用来确定桩头刚度项。Maflock 和 Recse(1960)对嵌入模量随深度变化的土中的刚性和柔性桩在横向荷载下的情况给出了广义迭代求解方法^[41]。Davisson 和 Gill(1963)研究了嵌入层状土介质中横向加载的桩的情形,每层土地基反力模量恒定,但各层不同。他们得出结论:近表面土模量是桩反应的控制因素,对土的研究和特性应该集中于这个区域^[42]。

(3) 弹性连续体法(Elastic Continuum)。弹性连续体法是基于 Mindlin 对点荷载施加于半无限体的近似解而发展起来的。解的精度与土的杨氏模量以及土的其它参数直接相关。这种方法的局限性在于很难考虑土-桩的非线性行为(可以采用等效线性化方法),它更适用于小应变、稳态振动问题。另外,该方法也不能考虑层状土,只对土层模量随深度恒定、线性增大和按抛物线增大三种情形有解。然而,真实的连续模型优点在于能固有地模拟辐射阻尼效应,而离散模型必须人为地模拟这种能量耗散模式。

3.4 数值方法

目前,用于桩-土-结构动力相互作用分析的数值法或半解析数值法主要有有限元法、边界元法、有限差分法、无限元法以及杂交混合法等^[43]。

(1) 有限元法。有限元法的优点是,它可以模拟任意土层剖面,研究三维效应;对群桩的 PSSI 分析可以以全耦合的方式,不必求助于单独计算场地或上部结构的反应,也无须应用群桩相互作用因子。另外,有限元法可以进行真正的非线性动力相互作用分析,而不是采用等效线性化方式。有限元的缺点是,必须提供合适的土体本构

模型,它必须能够模拟土从小到非常大的应变行为、反力退化;另外,在时域内进行整体分析,计算量相当大。

(2) 边界元法。在分析桩土结构相互作用的应用中,桩被模拟为一系列可横向和竖向运动的梁单元,其性状用动力刚度矩阵来描述,而周围土介质则被假定为均质或成层弹性半空间,用边界元法来模拟。边界元法的优点在于可以自动满足半空间各个方向上波的辐射条件,不必设置人工边界,但边界元法的系数矩阵是满阵,边界的光滑性要求较高,且不能进行非线性分析^[44]。

(3) 有限差分法。有限差分法与有限元法都属于有限体模型,用于模拟无限地基的辐射阻尼时也需要在边界上施加人工边界条件,或者将地基的离散范围选取得很大,使波在传递到边界时幅值很小。有限差分法适合大尺度(如地震波),方法简单,计算速度快,但是边界处理比较麻烦。

(4) 无限元法。无限元法是一种半解析数值方法,将无限地基与结构接触部分的有限区域划分为通常的有限单元网格,而无限地基的其余部分划分为伸向无穷远的无限元,无限元的形函数由插值函数和一个适当的衰减函数的乘积构造。这一衰减函数要求能反映场变量在无穷介质中的分布规律并保证单元刚度矩阵的广义积分满足收敛条件。

(5) 杂交元法。杂交元法是为了取不同方法的优点,将不同方法结合起来求解土-结构动力相互作用问题。杂交元法可以是解析法与数值方法的结合,也可以是不同部分采用不同数值方法。在土-结构动力相互作用中,常对近场土体及结构采用有限元,而对远场土体采用不同方法,如边界元,无穷元或半解析方法。

4 存在的问题

从 Winkler 模型^[45]提出到现在,人们对桩土结构之间的相互作用进行了大量有益的理论分析和试验研究,取得了不少成果,但还存在不少问题。

4.1 理论分析法问题

理论分析法发展较为完善,目前已经进入群桩分析研究阶段,可以用于桩筏基础分析,是目前数值方法无法处理大范围问题时的必要替代。但必须注意到使用经典理论分析法分析桩土相互作用时,不能很好地描述对桩相互作用影响很大的桩土接触面的力学特性。

4.2 数值分析方法问题

数值分析法存在的问题主要有接触面的处理、材料的本构、计算参数的选用和计算机容量的限制等。

(1) 接触面问题。为了更好地反映桩与土的相互作用,真实模拟桩与土体接触面上的力学行为,需要在桩土之间设置接触面单元。目前常用的接触面单元主要分为3类:以 Goodman 为代表的无厚单元^[46],以 Desai 为代表的薄单元^[47],以 Katona 为代表的接触摩擦元^[48]。

(2) 材料本构问题。由于土的突出非线性,到目前为止,还没有哪个本构模型可以体现土的各种特性。不同土的本构,往往针对某个问题才具有合理性,因此要

根据所研究的问题灵活选用土体本构。较土而言,混凝土材料的本构要简单的多。混凝土的本构,在低应力情况下,通常采用线弹性模型;在进行桩的极限状态分析时可选用损伤本构模型。

(3) 计算参数的选用问题。现场土体的性质很不均匀,且各向异性,选取计算参数比较困难。实际计算时,往往对某一段范围内土体进行简化。另外,用仪器很难测定地基的侧压力系数,其一般按经验公式取值,带有随意性。计算参数取值不同,计算结果也不同,这将影响数值分析的可信度。

(4) 计算容量有限。无论是有限元法还是其他的数值计算方法,计算模型大多比较简单,这是因为目前的计算机内存容量还不足以处理大规模的非线性三维模拟问题,严重制约着复合地基的三维分析。

鉴于以上难题,目前的理论分析只有在评价影响桩的工作性状参数时才有意义。

4.3 试验问题

由于不能模拟自重应力条件,桩的小比例尺模型试验无法准确地观测到桩基深处土层在实际应力条件下的性状及其与桩的相互作用。室内试验存在着尺寸效应,而桩的现场静载荷试验,因影响因素过多,必须经过大量的试验积累,才能找出规律。

5 发展方向

5.1 接触面本构的完善

桩土作为整体进行数值建模时,关键是桩土接触面的处理问题。虽然接触面单元较多,但有的单元并不能正确反映桩土间的相互作用力学机理,因此需要针对所研究的桩型选用恰当的单元形式来描述桩土间的接触特性,寻找一个恰当的接触面本构。

5.2 计算方法的改进

计算方法的改进方式主要有:(1)有限元法自身完善,如广义位移法在土-结构相互作用问题分析中的应用。(2)有限元法与其他方法相结合,如有限元与无界元耦合,有限元与有限层耦合,以及有限元法同经典理论分析方法相结合等。(3)采用其它新方法。

5.3 数值分析方法与室内外试验相结合

模型试验和数值分析相结合,进行优势互补,是桩-土-结构相互作用分析领域的发展方向之一,其最终目的是提出和验证更为简单有效的计算方法。例如,将振动台试验与数值分析相结合,参照振动台试验的加载过程,采用数值方法模拟模型的应力和变形,将结果与振动台试验结果进行比较,以验证数值分析方法的合理性,再采用数值分析方法计算原型的应力和变形。

5.4 震害调查和原型观测资料的收集

桩-土-结构相互作用分析主要的不确定因素是缺乏必要的实际数据,而震害是最真实的“原始试验”,通过对地震区灾害的调查,可以对桩-土-结构相互作用分析提供重要的理论依据和实际破坏数据,推动桩-土-结构相互作用研究工作的深入。

5.5 空间分析模型研究

不管是上部结构、基础还是土体,在桩-土-结构作用中都处于三维受力状态,利用二维或一维分析,能够得出一些结论,但从实用上来说,三维模型分析将是今后研究的主要方向。

6 结束语

有限元方法是桩-土-结构相互作用机理分析中一个有效的手段,但在模拟桩土界面,选择计算参数及土的本构关系等仍有许多问题有待于进一步探索和研究。限于当前的计算机技术水平,桩土相互作用的研究需要探索更好的计算方法。模型试验与数值分析方法相结合是今后桩土相互作用研究的一大发展方向。

参考文献:

- [1] 李国豪.工程结构抗震动力学[M].上海:上海科技出版社,1980.
- [2] 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.
- [3] wblf J P.土-结构动力相互作用[M].吴世明,译.北京:地震出版社,1989.
- [4] 熊建国.土-结构动力相互作用问题的新进展(II)[J].世界地震工程,1992,4:17-25.
- [5] Meyerhof G G. Some recent foundation research and its application to design[J]. Struct. Engr, 1953(31):151-167.
- [6] Chamecki S. Structural rigidity in calculating settlements. J. Soil Mech. and Found[J]. Div. ASCE, 1956(82):SML1-9.
- [7] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范[S].
- [8] Grosshof H. Influence of flexural rigidity of superstructure on the distribution of contact pressure and bending moments of an elastic combined footing[J]. Proc. 4th IC-SMFE. London, 1957(1):300-306.
- [9] Paramelee R A. Building-foundation interaction effects [J]. J. Engineering Mechanics Div, ASCE, 1967, 93(2): 131-152.
- [10] Chopra A K, Perumalswami P R. Dam foundation interaction during earthquake[A]. Pro. 4th WCEE[C]. Santiago, Chile, 1969.
- [11] Lysmer J, Wass G. Shearwaves in plane infinite structures[J]. Eng. Mech. Div., ASCE, 1972, 98(1):85-105.
- [12] Kausel E. Forced vibrations of circular foundation on layered media[R]. Tech. Rep. Res. Rep, R74-11, Dept. of Civil Eng. MIT, Cambridge, Mass, 1974.
- [13] Luco J E. Vibrations of a rigid disc on a layered viscoelastic media[J]. Nuclear Eng. Des., 1976, 36(3):325-340.
- [14] Dasgupta S P, Kameswara N, Rao S V. Dynamics of rectangular footings by finite elements[J]. J. Geotech. Eng. Div., ASCE, 1978, 104(5):621-637.
- [15] Dominguez J. Dynamic stiffness of rectangular foundations[R]. Tech. Rep. R78-20, Dept. of Civil Eng. MIT, Cambridge, Mass, 1978.
- [16] 王贻荪.半无限体表面在竖向集中谐和力作用下表面竖向位移的精确解[J].力学学报,1980(4):386-391.
- [17] Iguchi M, Luco J E. Dynamic response of flexible rec-

- tangular foundations [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1981, 10(3):239-249.
- [18] Futaki M. Experiments about seismic Performance of Reinforced Earth Retaining Wall[A]. In: Proc. 11th WCEE, 1996, 1083.
- [19] Nasuda T, Akino K, Toshio Y. A Dynamic Model Test and Analysis of A Steel Pipe Piled Well Foundation [A]. In: Proc. 11th WCEE, 1996, 1085.
- [20] Cheung Y K, Zienkiewicz O C. Plate and Tanks on Elastic Foundation and Application of Finite Element Method[J]. Int. J. Solids Struct, 1965, 1(3):451-461.
- [21] Peizien J. Seismic Analysis of Bridges on Long Piles [J]. J. Engng. Mech. Div. ASCE. 1964. 90(EM)3: 1237-1244.
- [22] Smith W. A Non-reflecting Plane Boundary for Wave Propagation Problems[J]. Jour Comp Phys., 1973, 15(1):492-503.
- [23] Ahmad S, Benerjel P K. Multi domain boundary element method for the dimensional problems in elastic dynamics[J]. Int. J. Numer. Methods in Eng., 1988, 26(4):891-991.
- [24] Bernal D, Youseff A. A hybrid time-frequency domain formulation for nonlinear soil-structure interaction[J]. Earthquake engineering and structural dynamics, 1998, 27(6):670-685.
- [25] 职洪涛, 俞载道, 曹国教. 基础提高、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.
- [26] Nasuda T, Akino K, Izumi M. Embedment Effect Test on Soil-Structure Interaction[A]. 11th SMIRT, Kol K1, 1991, 111-116.
- [27] 王开顺. 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, 7(2):64-76.
- [28] 林皋. 中国地震工程研究进展[M]. 北京:地震出版社, 1992.
- [29] 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.
- [30] 林皋. 土-结构动力相互作用[J]. 世界地震工程, 1991(1):4-21.
- [31] 梁青槐. 土—结构动力相互作用数值分析方法的评述[J]. 北方交通大学学报, 1997, 21(6):690-694.
- [32] 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.
- [33] 李辉. 土-结动力相互作用[D]. 重庆:重庆建筑大学, 1999.
- [34] 陈跃庆, 吕西林, 李培振. 分层土—基础—高层框架结构相互作用体系振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2001, 21(3):104-112.
- [35] 吕西林, 陈跃庆. 高层建筑结构—地基地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.
- [36] 吕西林, 陈跃庆, 陈波. 结构—地基地动力相互作用体系振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2000, 20(4):20-29.
- [37] 徐志英, 施善云. 土与地下结构动力相互作用的大型振动台试验与计算[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(4):1-7.
- [38] 楼梦麟, 王文剑, 马恒春. 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):763-768.
- [39] 陈波, 吕西林, 李培振. 用 ANSYS 模拟结构—地基地动力相互作用振动台试验的建模方法[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(1):126-131.
- [40] Nogami T. Soil-Pile Interaction Model for Earthquake Response Analysis of Offshore Pile Foundations[A]. In: 2nd Int Conf On Recent Advances Geotech Eng and Soil Dyn. St. Louis, 1991, 2133-2137.
- [41] Natlock H, Reese L. Generalized solutions for laterally loaded piles[J]. Soil Mechanics and Foundation Div. ASCE, 1960, 86(5):63-91.
- [42] Davisson M, Gill H. Laterally loaded piles in a layered system[J]. Soil Mechanics and Foundation Div. ASCE, 1963, 89(5):63-94.
- [43] 陈清军, 姜文辉, 楼梦麟. 群桩基础三维非线性地震反应分析[J]. 振动与冲击, 2003, 22(3):98-102.
- [44] 刘勇生. 桥梁结构抗震研究的文献综述[J]. 世界地震工程, 1992, 10(1):48-55.
- [45] winkler E. In die lehre von der elastizitat and festigkeit [M]. Prague: Domicus, 1867:182.
- [46] Goodman E, Taylor R L, Brekke T L. A model for the mechanics of jointed rock[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE, 1968, 94(3):637-659.
- [47] Desai C S, Drumm E C, Zaman M M. Cyclic testing and modeling of interfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering. ASCE, 1985, 111(6):793-815.
- [48] Katona M G. Simple contact-friction interface element with applications to buried culverts[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1982, 7:371-384.

Review and Prospects on Pile Soil Structure Interaction

ZHU Shou-peng, LIU Qi-mao

(Department of Civil Engineering, Guangxi University of Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract: In consideration of the influence of pile soil structure interaction on the dynamic properties and seismic response of structure, a summary is made on the former and current researches on pile soil structure interaction (PSSI) at home and abroad. Four major types of research methods for PSSI, the seismic damage investigation, numerical method, theoretical analysis method and the experimental method, as well as their strengths and weaknesses and related problems are reviewed. It is pointed out that the perfection of interface constitutive model, the improvement of computational method, and the combination of numerical analysis with experimental study, the seismic damage investigation and collection of prototype measurement data, and the spatial analysis model research are the trend of further research on PSSI.

Key words: pile-soil-structure-interaction (PSSI); numerical analysis; theoretical analysis; nonlinearity