

桩土相互作用研究综述

戴 民,周云东,张 霆

(河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要 鉴于桩土相互作用研究在刚性桩复合地基理论研究中的意义,对国内外桩土相互作用研究现状进行了总结,介绍国内外桩土相互作用两大类研究方法——理论分析方法、试验方法各自的特点和适用范围,并分析了其各自存在的主要问题,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是桩土相互作用问题研究的发展方向。

关键词 桩土相互作用;接触面;数值分析;模型试验;复合地基

中图分类号 :TU447 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2006)05-0568-04

我国东部沿海地区因广泛分布着淤泥质粉质黏土地层,在工程建设中存在大量的软土地基加固问题,如何快速、有效地加固软土地基成为当前岩土工程界研究的热门课题。软土地基加固的主要技术有:排水固结法、换土垫层法、灌浆法、复合地基等^[1]。因复合地基技术对软土加固直接有效,能快速提高承载力,工后沉降相对较小,且具有广泛的适用性,其应用越来越广泛。目前困扰公路建设的桥头跳车、工后沉降等问题也主要采用 CFG 桩^[2]、PCC 桩^[3]等刚性桩复合地基技术进行处理。

然而,复合地基的理论研究落后于工程实践。许多学者^[4]认识到,研究复合地基中桩与土的相互作用,将有助于了解复合地基的承载机理,以便充分利用桩基承载和抵抗变形的能力,优化复合地基设计、施工方案,取得更好的软基加固质量。因此本文对桩土相互作用的研究状况作一综述,介绍国内外桩土相互作用两大类研究方法各自的特点和适用范围,分析其各自存在的主要问题,指出了桩土相互作用问题研究的发展方向。

1 桩土相互作用的研究现状

桩土相互作用问题属于固体力学中不同介质的接触问题,表现为材料非线性(混凝土、土为非线性材料)、接触非线性(桩土接触面在复杂受荷条件下有黏结、滑移、张开、闭合 4 形态)等,是典型的非线性问题。

为了能够全面地评价桩土的相互作用问题,通常需要确定桩、土体各自的应力和应变以及接触区域处位移和应力分布的数据,对影响桩土相互作用的各因素进行全面研究。研究桩土相互作用问题需要考虑的因素有:(a)土的变形特征;(b)桩的变形特征;(c)桩的埋置深度;(d)时间效应(土的固结和蠕变);(e)外部荷载的形式(静载或动载);(f)施工顺序(即开挖、排水以及基础和上部结构施工各个阶段的影响)。

目前桩土相互作用的研究方法主要有理论分析法和试验方法。

1.1 理论分析方法

1.1.1 经典理论分析法

a. 弹性理论法。以 Poulos^[5]方法为代表。假定桩和土为弹性材料,土的杨氏模量 E_s 或为常数或随深度按某一规律变化。由轴向荷载下桩身的压缩求得桩的位移,由荷载作用于半无限空间内某一点所产生的 Mindlin 位移解求得桩周土体的位移。假定桩土界面不发生滑移,即可求得桩身摩阻力和桩端力的分布,进而求得桩的位移分布。如果假定 Mindlin 位移解在群桩的情况下仍旧适用,则弹性理论法可以被推广至群桩的相互作用分析中。

b. 剪切位移法。以 Cooke 等^[6-8]为代表。根据线性问题的叠加原理,可将剪切位移法推广到群桩的桩土相互作用分析中。Nogami 等^[9]基于上述思想再把每根桩分成若干段并考虑地基土分层特性,得到比 Mindlin 公式积分大为简化的数值计算方程组。剪切位移法的优点是在竖向引入一个变化矩阵,可方便考虑层状地基

的性况 ,均质土不需对桩身模型进行离散 ,分析群桩时不依赖于许多共同作用系数 ,便于计算。

c. 荷载传递法.荷载传递法本质为地基反力法.根据求取传递函数手段的不同 ,可将传递函数法分为 Seed 等^[10-11]提出的位移协调法和佐腾悟等^[12]提出的解析法.荷载传递法可较好地模拟单桩性状.由于没有考虑土体的连续性 ,荷载传递法一般不能直接用于群桩 ,除非经分层积分位移迭代或与有限元耦合。

1.1.2 数值分析方法

随着计算机技术的不断发展 ,计算机处理非线性问题的能力有了极大的提高 ,以有限元法为主的数值分析方法逐渐成为桩土相互作用分析的最有效方法。

汪克让等^[13]采用 Biot 固结理论 ,使用 8 结点等参元、无界元、接触面单元对桩土体系进行离散 ,通过分析土体固结过程中地面的沉降特性 ,研究桩间土承受荷载的可能性.张崇文等^[14]提出一种解决三维空间桩与土相互作用的有限层-有限元混合模型 ,将半无限空间问题转化为准二维平面问题进行求解.王玉杰等^[15]应用有限棱柱单元、无限棱柱单元离散桩土体系 ,在计算中用理想弹塑性弹簧模拟桩土之间的相互作用 ,对在集中荷载作用下由 4 根长桩组成的群桩与土相互作用体系进行了三维弹塑性分析.黄昌礼等^[16]通过在土和桩之间设置接触面单元 ,对某工程的 2 个剖面进行桩土相互作用平面非线性有限元分析 ,以详细了解桩及土的变形场及应力场分布.娄亦红等^[17]使用有厚度的接触面单元与有限元、无界元相耦合进行数值分析 ,求解桩土相互作用体系的应力和变形 ,计算结果与现场观测数据能较好地吻合。

1.2 试验方法

1.2.1 室内模型试验

限于人力、物力、财力、时间或其他因素无法进行现场原型试验时 ,模型试验成为研究问题的一种有效方法.室内模型试验主要有常规模型试验和离心模型试验。

a. 常规模型试验.王幼青等^[18]在实验室进行了不同桩距和桩数的模型桩基础载荷试验 ,通过试验认识到桩距和桩数对土体相互作用的影响规律.黄海峰等^[19]通过改进的三轴试验 ,研究了碎石桩复合地基横向桩土的相互作用 ,提出碎石桩复合地基的桩土相互作用可用桩土相互作用系数 k_{ps} 表征.杨进等^[20]按 10:1 的比例 ,进行了黏性土质条件下的群桩施工模拟试验.通过试验 ,研究了群桩条件下的桩土相互作用 ,得出群桩作用对土应力场的影响关系。

b. 离心模型试验.离心模型试验可在高重力场条件下全仿真模拟施加荷载及挖方、填方等施工过程 ,但试验费用较高 ,试验规模很大 ,周期较长。

1.2.2 现场原型试验

在桩基工程中 ,最能说明问题的是群桩或单桩的原型试验.河海大学岩土工程科学研究所为研究 PCC 桩复合地基理论开展了包括单桩静载荷试验 ,复合地基静载荷试验 ,静力触探 ,小应变测试 ,表面沉降观测 ,分层沉降观测 ,地下水平位移观测 ,桩顶、桩间土压力观测在内的大量现场试验 ,论证了其加固软土地基的可行性和科学性 ,同时也为 PCC 桩桩土相互作用的研究提供了第一手资料。

2 存在的问题

从 Winkler 模型^[21]提出到现在 ,人们对桩土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。

2.1 理论分析问题

2.1.1 经典理论分析法

经典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。

2.1.2 数值分析方法

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、计算机容量的限制等。

a. 接触面问题.为了更好地反映桩与土间的相互作用 ,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^[22] ,以 Desai 为代表的薄单元^[23] ,以 Katona 为代表的接触摩擦元^[24]。

虽然接触面单元较多,但有的单元并不能完全反映桩土间的相互作用力学机理,因此需要针对所要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,必要时通过专门试验,确定接触面单元的本构。

b. 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。

c. 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。

d. 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。

2.2 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。

3 今后发展的方向

3.1 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。

3.2 计算方法的改进

计算方法的改进方式主要有:(a)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;(b)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;(c)新方法不断涌现,如目前备受岩土工程界注意的神经网络,十分适合处理类似于桩土相互作用这种非线性十分突出的力学问题. 虽然还没有神经网络用于桩土相互作用研究的报道,但可以相信其前景十分广阔。

3.3 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,将离心试验与数值分析相结合,参照离心模型试验的加载过程,采用数值方法模拟模型的应力和变形,将结果与离心试验结果进行比较,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。

4 结 语

接触面问题是桩土相互作用分析中最为突出的问题,针对桩型采用恰当的接触面单元,是保证桩土相互作用数值分析正确性的首要任务. 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,模型试验为其提供了便利. 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] 殷宗泽, 龚晓南. 地基处理工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000: 15-17.
- [2] 阎明礼, 吴春林, 杨军. 水泥粉煤灰碎石桩复合地基试验研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(2): 55-62.
- [3] 刘汉龙. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II): 工程应用与试验[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 372-375.
- [4] 龚晓南, 俞建霖. 地基处理理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002: 491-515.

- [5] POULOS H G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement[J]. JSMFD ,ASCE ,1973 ,9(SM5) :391-406.
- [6] COOKE R W , PRICE G ,TARR K. A study of load transfer and settlement under working conditions[J]. Geotechnique ,1979 ,29(2) :113-147.
- [7] RANDOLPH M F ,WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division , 1978 ,104(12) :1465-1488.
- [8] 罗惟德. 单桩承载力机理分析与荷载-沉降曲线的理论推导[J]. 岩土工程学报 ,1990 ,12(1) :36-44.
- [9] NOGAMI T ,CHEN H L. Simplified approach for axial pile group response analysis[J]. GED ,ASCE , 1984 ,110(9) :1239-1255.
- [10] SEED H B ,REESE L C. The action of soft clay along frictional piles[J]. Transaction ASCE ,1957 ,22 :731-746.
- [11] COLYLE H M ,REESE L C. Load transfer for axially loaded piles in clay[J]. SMFD ,ASCE ,1960 ,9(2) :1-26.
- [12] 佐腾悟. 基础の支持の力学は机构[J]. 土木技术 ,1965 ,20 :1-5.
- [13] 汪克让 , 刘海青 , 荆勇. 固结土体与结构相互作用弹塑性有限元分析[J]. 天津大学学报 ,1994 ,27(6) :728-735.
- [14] 张崇文 , 何广民 , 王牲. 三维空间桩与土作用的有限层-有限元混合法[J]. 天津大学学报 ,1994 ,27(5) :630-637.
- [15] 王玉杰 , 严宗达 , 刘作春 , 等. 有限棱柱法在群桩与土相互作用分析中的应用[J]. 天津大学学报 ,1997 ,30(2) :170-174.
- [16] 黄昌礼 , 谢肖礼. 桩与土相互作用非线性有限元分析[J]. 广西大学学报 ,2002 ,27(2) :175-178.
- [17] 娄奕红 , 刘喜元. 桩土相互作用的有限元-界元分析[J]. 城市道桥与防洪 ,2004(2) :33-38.
- [18] 王幼青 , 张克绪 , 朱腾明. 桩-台-基土相互作用试验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报 ,1998 ,31(2) :31-37.
- [19] 黄海峰 , 李广信 , 陈轮. 碎石桩复合地基中桩土横向相互作用研究的一种室内试验方法[C]//第八届土力学及岩土工程学术讨论会议论文集. 杭州 :浙江大学出版社 ,1999 :205-208.
- [20] 杨进 , 彭苏萍. 群桩条件下桩土相互作用实验研究[J]. 岩土力学 ,2004 ,25(2) :312-315.
- [21] WINKLER E. In die lehre von der elastizitat und festigkei[M]. Prague :Domonicus ,1867 :182.
- [22] GOODMAN R 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.
- [23] DESAI C S ,DRUMM E C ,ZAMAN M M. Cyclic testing and modelling of interfaces[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,ASCE , 1985 ,111(6) :793-815.
- [24] KATONA M G. Simple contact-friction interface element with applications to buried culverts[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics ,1983 ,7 :371-384.

Recent researches on soil-pile interaction

DAI Min , ZHOU Yun-dong , ZHANG Ting

(Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract :In consideration of the significance of soil-pile interaction (SPI) in the research of the theory of the rigid pile composite foundation , a summary is made on current researches on SPI at home and abroad. Two types of research methods for SPI , i. e. the theoretical analysis method and the experimental method , as well as their characteristics , applicability , and some 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 are the trend of further research on SPI.

Key words :soil-pile interaction ; interface ; numerical analysis ; model test ; composite foundation