

水平荷载下桩基受力特性研究综述

马志涛

(河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要 通过对水平荷载下桩基受力特性研究的综述,对国内外相关研究的理论方法等进行总结,详细介绍了目前国内外常用的弹性地基反力法以及 $p-y$ 曲线法等理论方法,分析了其各自的特点及适用条件,给出了水平荷载下桩基受力特性分析中有待研究的问题,为进一步研究大直径现浇混凝土薄壁管桩(PCC 桩)在水平荷载下的受力特性提供研究思路.

关键词 水平荷载 桩基 受力特性 PCC 桩

中图分类号 :TU411.3 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-1980(2006)05-0546-06

桩基作为一种重要的基础形式,在岩土工程中应用广泛^[1].与桩基的竖向承载性相比,桩基的水平受力特性比较复杂.长期以来,人们一直偏重于研究桩基在竖向荷载作用下的工作性能,而对水平荷载作用下的性能研究较少^[2].20 世纪初以来,国内外众多学者开始研究水平荷载作用下桩受力特性的理论,到 20 世纪 60 年代,由于大直径桩的兴起和普遍使用,促使该项研究得以广泛的开展.目前,已有很多水平承载桩的作用机理及其受力特性分析方面的相关理论和方法,为桩基在港口码头、海堤工程等以水平荷载为主要控制荷载的工程中得以广泛应用奠定了理论基础.

本文针对目前水平荷载作用下桩基受力特性研究现状进行综述,总结分析相关的理论方法及其特点,提出了目前水平承载桩研究中有待解决的问题.

1 研究现状

1.1 理论研究

1.1.1 弹性分析法

弹性分析法假定桩埋置于各向同性的半无限体中,并假定土体的弹性系数 E_s 随深度按一定规律变化.计算时将桩分成若干微段,同时根据半无限体中受水平力并发生位移的 Mindlin 方程估算微段中心处桩周土位移,根据桩的挠曲方程求桩的位移,用有限差分表达,由桩、土位移相等条件求解方程. Poulos 等^[3-4]曾用弹性理论推导出了桩顶位移和转角的计算公式.

由于弹性理论分析法不能计算地面以下桩的位移、转角、弯矩和土压力,且土体的弹性系数 E_s 值难以确定,因此该法实际应用不是太多.但弹性理论分析法考虑了在水平荷载作用下桩土出现的脱离和土的局部屈服,有助于进一步探索桩土的性状.

1.1.2 地基反力法

a. 极限基地反力法.首先假定处于极限状态的地基土反力分布的形式,再由桩的力平衡条件求桩侧土抗力.根据极限状态地基土反力分布的不同假设形式,地基土反力法可分为土反力按二次抛物线分布法和土反力按直线分布法.冈部三郎等^[5-7]分别利用假设土反力按直线分布法求解桩的水平力.极限地基反力法只适用于刚性短桩,而不宜用于弹性长桩分析.

b. 弹性地基反力法.基于 Winkler 地基模型,将桩周土看作弹性体,用梁的弯曲理论求解土抗力.同时假设桩侧土抗力仅与土的深度和桩的挠度有关.单位土抗力表示为

$$p(y,z) = K(z)y^n \tag{1}$$

收稿日期 2005-04-18
基金项目 江苏省交通科技重点资助项目(02Y011)
作者简介 马志涛(1974—),男,山东烟台人,博士研究生,主要从事岩土工程的研究.

式中： K ——由土的性质决定的地基反力系数，与深度 z 有关； y ——桩的挠度； n ——水平位移指数。

根据 n 取值不同，弹性地基反力法又可以分为 $n = 1$ 时的线弹性地基反力法和 $n \neq 1$ 时的非线性弹性地基反力法。由于解答比较困难，非线性弹性地基反力法很少应用。根据地基反力系数 K 的不同假设，线弹性地基反力法又可以分为常数法、 c 法、 K 法和 m 法等。

常数法(张氏法)假定地基反力系数沿深度为常数分布。由于结果与实际不符，该法已被淘汰。

安盖尔斯基提出的 K 法假定地基反力系数在第一弹性零点以上呈凹形抛物线分布，第一弹性零点以下为常数^[8-9]。该法过低估计了近地面的桩侧土抗力，因此得出的桩身弯矩偏大，且随着桩入土深度的加大，由 K 法计算的桩顶位移和转角也越大，这与实际不符^[10]。

m 法则假定水平地基反力系数随深度成线性增加^[11]，即

$$K(z) = mz \tag{2}$$

由于 m 法既可以用解析法也可以用数值解法求解，使用非常方便，因此在国内外应用广泛，是我国相关规范^[12]推荐使用的方法之一。 m 法主要适用于正常固结的黏性土和一般砂土。但 m 法中地基反力系数的比例系数 m 是计算结果比较敏感的一个参数， m 值的正确与否直接关系计算结果的正确性。而影响 m 的因素很多，同一种土由于地质条件的不同， m 的取值不同；即使地质条件相同，由于水平荷载大小、桩刚度等不同， m 的值也不同。因此，对于某一特定的桩基计算问题，在没有试桩的情况下，很难给出合适的 m 值。此外， m 法在桩顶位移较小的情况下能较好地反映出桩的受力特性。在桩身位移较大、桩侧土体进入非线性状态时，按 m 法计算得到的泥面位移、桩身弯矩及其位置等与实测结果有一定的差异，且随着荷载的加大，差异逐渐增大^[13]。如何给出合适的 m 值仍需进一步研究。

c 法是我国公路部门应用较多的一种弹性地基反力法，由陕西省交通科学研究所于 1974 年提出。 c 法假定地基反力模式为

$$\begin{cases} k = cx^{0.5} & (z \leq 4.0/\lambda) \\ k = c(4.0/\lambda)^{0.5} = \text{const} & (z > 4.0/\lambda) \end{cases} \tag{3}$$
$$\lambda = \sqrt[4.5]{\frac{cD}{EI}}$$

式中： λ ——桩的特征值； c ——水平地基反力系数随深度变化的比例系数； z ——桩入土深度。

土体作为一种弹塑性体，即使在小位移条件下，力与位移也很难满足线弹性关系。因此，国内外众多学者先后提出了许多非线性弹性地基反力法。如久保浩一^①提出的 $n = 0.5$ 的“久保法”、横山幸满等^[14-15]采用不同的方法给出了桩身内力和位移的解答，竹下淳^[16]探讨了指数 n 为其他整数时的解答，吴恒立^[17-18]提出了基于综合刚度原理的双参数法，使计算结果比线弹性的单一法更接近实际情况。新的非线性计算方法 NL 法^[19]已被我国修订的《港口工程桩基规范》推荐使用^[20]。该法适用于大位移情况，且所需的土质参数性质稳定，容易获得，但对于多土层计算误差较大。此外，王梅等^[21-22]也提出了一些非线性弹性分析方法。与线弹性分析相比，非线性更符合实际，但其求解往往非常困难。

1.1.3 p - y 曲线法

p - y 曲线法最早由美国的 Matlock 提出。由于其考虑了桩土作用的非线性和土的塑性影响，对大小位移的情况以及静、动荷载均适用，是目前国内外比较流行的一种方法。

国内外众多学者对 p - y 曲线法进行了研究。McClelland 等^[23]通过研究发现，桩侧土抗力与室内土固结不排水三轴压缩试验的应力、应变曲线有相似关系。Matlock^②利用这一关系给出了短期静载或周期荷载作用下软黏土的 p - y 计算方法，被美国 API 规范采用。Reese 等^{③,④}给出了硬黏土中短期静载或周期荷载作用下的 p - y 曲线计算方法，并通过现场试验分析，给出了砂土短期荷载或周期荷载作用下的 p - y 曲线计算方法，被 API 规范采用。1987 年，美国 API 规范对该法进行修改，给出改进的第 17 版法。

我国学者也对 p - y 曲线法进行了改进。20 世纪 80 年代，河海大学的研究者发现，常规三轴试验中的应力

① 久保浩一. 桩の横抵抗の新しい計算法. 港湾技術研究报告, 第 2 卷, 第 3 号, 1964 35-43.

② MATLOCK H. Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay. 2nd Offshore Tech Conf. Houston. 1970 577-594.

③ REESE L. Field testing and analysis of laterally loaded piles in stiff clay. 7th Offshore Tech Conf. Houston. 1975 473-483.

④ REESE L C, COX W R. Analysis of laterally loaded piles in sand. 6th Offshore Tech Conf. Houston. 1974 600-619.

应变曲线和试验所得的 $p-y$ 曲线都符合邓肯模型,可以用双曲线函数表示,从而提出了一种新的软黏土统一 $p-y$ 曲线法,称为河海大学法^[24-26],其 $p-y$ 曲线表达式为

$$\begin{cases} p/p_u = \frac{y/y_{50}}{a + b(y/y_{50})} & (y/y_{50} \leq \beta) \\ p = p_u & (y/y_{50} > \beta) \end{cases} \quad (4)$$

$$a = \frac{\beta}{\beta - 1} \quad b = \frac{\beta - 2}{\beta - 1} \quad \beta = \frac{\varepsilon_{100}}{\varepsilon_{50}}$$

式中: ε_{100} 、 ε_{50} ——三轴不排水试验中最大应力差和最大应力差一半时所对应的应变值; p_u ——土体的极限水平土抗力; β ——土质特性的特征参数。

$$p_u = KAC_u D \quad (5)$$

$$K = \frac{100D}{3 + 8.3D} + \frac{4x/D}{1 + 0.4x/D} \quad A = 0.05/D + 0.2$$

式中: x ——泥面下深度; D ——桩径; C_u ——土的不排水抗剪强度; A ——与桩径有关的参数。

此外,章连洋等^[27]通过室内模型试验,提出了黏性土中 $p-y$ 曲线的计算新方法。高明等^[28]对侧向静、动、循环荷载作用下桩的性能进行研究,提出了 $p-y$ 建议公式。

现行规范中只建立了黏性土、砂土的 $p-y$ 曲线,对于砂土和黏性土混合分层的地基还没有相应的 $p-y$ 曲线,这是以后应该研究的问题。另外,对黏性土而言,不排水抗剪强度 C_u 和 ε_{50} 是 2 个重要的影响参数^[29-30],如何合理选取这些参数是准确计算的关键。文献^[31]曾利用神经网络法对这 2 个参数进行研究。此外, $p-y$ 曲线法的求解较为复杂,一般需通过差分数值法求解。

1.1.4 数值分析法

近年来国内外许多学者用数值分析法对水平荷载作用下桩的受力特性进行了研究。Chen Chien-yuan^[32]用有限差分法研究了桩与土体相互作用的受力性状; Yang Zhao-hui 等^[33]利用有限元法对层状弹塑性土体中的侧向承载桩进行了数值模拟; Zhang Li-min 等^[34]用数值分析法对砂土中的群桩进行了研究; 李桐栋等^[35]利用有限元法和 $p-y$ 曲线法对桩土相互作用进行了非线性分析; 张明武^[36]用边界元法分析了水平承载桩; Kucukarslan 等^[37]用有限元-边界元相结合的杂交元法研究了侧向承载桩,桩和结构体用弹性有限元法,桩周土体用边界元法,并经试验验证了该法的正确性; 赵伟封^[38]用有限元-边界元法分析了水平荷载作用下的单桩; 王年香^[39]用三维有限元法分析了码头侧向承载桩与岸坡的相互作用; Sitharam 等^[40]用非线性有限元法对侧向荷载作用下的桩进行了分析。

由于岩土工程的复杂性,单纯从理论上对桩基受力特性进行分析解答有一定的困难,而数值分析法具有计算能力强,能适用于复杂的地质条件、受力形式等优点,逐渐成为解决岩土问题的一个重要方法。但如何建立合理的计算模型,选取相关的计算参数等都是影响数值分析正确性的主要问题。

1.2 试验研究

试验研究是桩基研究的重要手段,主要包括室内模型试验和现场试验。早在 20 世纪 70 年代, Davission 等^[41]就用铝合金管在干标准砂中进行模拟桩基水平受力特性的模型试验。后来, Mayne 等^[42-43]又利用有机玻璃模型、钢管以及木质模型等进行了试验研究。为了更好地模拟实际工作条件,离心机逐渐受到人们的重视, Dyson 等^[44]曾利用离心机模型对砂土中单调水平荷载作用下的桩进行了受力分析,得到了很好的结果。在国内,王梅等^[21]提出了水平荷载作用下单桩的简单合理的计算方法,使计算结果可以考虑单桩非线性响应的影响; 吴春林等^[45]通过室内模型试验对 CFG 桩进行分析; 黄质宏^[46]对不同入土深度、不同桩径低配筋率的灌注桩在水平荷载作用下的受力特性进行了现场-试验研究; 徐和等^[47]对冲吸式灌注桩进行了横向荷载承载力试验分析; 李兵^[48]对粉细砂中的短桩在单向单循环荷载和单向多循环荷载作用下的受力特性进行了研究,认为在单桩水平荷载时不宜采用单向多循环加载方式,而采用单向单循环加载方式可以使现场试验较为简便; 宋功和^[49]对小孔径桩基在水平荷载作用下的工作形状,以及影响单桩水平承载力的因素进行了

试验研究 赵明华等^[50]以合金铝管作为模型桩,分析了轴、横向荷载联合作用下的桩受力特性.

为了使试验结果更加准确,有必要进一步改进和研究试验仪器、加载方法、地质条件模拟以及模型桩材料相似性等问题.

2 水平荷载作用下桩基受力特性研究存在的问题

a. 虽然国内外理论研究已取得了不少成果,但真正适用于工程实际的不是很多.目前国内外常用的 m 法和 $p-y$ 曲线法,也存在很多问题. m 法虽然简单,但不能反映桩土作用的非线性; $p-y$ 曲线法虽然能反映桩土作用的非线性,但 $p-y$ 曲线的形式和参数的选取较困难,且不能反映桩头约束条件等对桩受力的影响^[51].

b. 多数研究方法只适用于均质或均变地基,而对于多层等非均质地基多采用加权平均的方法,这很容易掩盖桩土实际作用的突变现象,产生较大的计算误差^[52].

c. 在水平承载桩的研究中,地基反力系数是一个关键的参数,目前地基反力系数多是按照一定假设给出的,如何确定一个合理的地基反力系数仍有待研究.

d. 在数值分析中,如何建立合理的计算模型,选取相关的计算参数等都是影响数值分析正确性的主要问题.

3 水平荷载作用下 PCC 桩受力特性研究思路

振动沉模大直径现浇混凝土薄壁管桩(简称 PCC 桩)是近几年开发的一种新桩型^[53-54].由于该桩型具有自动排土、现浇成桩、土层适应性强、施工速度快以及桩径较大(1.0 ~ 1.5 m)等特点,在软基处理中应用广泛.

PCC 桩用于高速公路工程的软基处理时,观测到填筑较高的路堤坡角处的水平位移仅几 cm,为一般堆载预压等加固方法的 $1/10 \sim 1/20$ ^①,表明 PCC 桩具有很好的抵抗水平变形的能力,因此,开展 PCC 桩的水平受力特性研究具有重要的意义.目前,关于水平荷载作用下 PCC 桩受力特性的研究很少,何晓进^[1]曾利用室内模型试验和数值模拟的方法对影响 PCC 桩水平受力特性的因素进行初步分析.为全面了解水平荷载作用下 PCC 桩的受力特性,有必要从以下几个方面着手研究:

a. 试验研究.桩的入土深度、桩径大小、桩壁厚度、桩身材料强度、桩顶约束条件以及受荷载方式等都是影响桩水平承载性的主要因素.要研究桩的受力特性,就必须通过室内试验和现场试验对上述各种因素进行全面分析.现场试验能真实反映桩的受力特性,是最理想的研究手段.但由于现场条件的限制,试验费时、费资、费力,规模一般较小,因此,有必要根据 PCC 桩的工艺特点,设计合理的室内模型试验.

b. 理论研究.要正确分析水平荷载作用下 PCC 桩的受力性状,还必须进一步从理论上对桩土相互作用进行分析,主要包括:(a)如何考虑天然地基土的非均质性,如地基沿深度方向的成层分布,沿水平方向的弹塑性等;(b)桩侧地基水平抗力系数在非均质地基中沿深度的分布规律等.

c. 数值分析.在利用有限元、边界元、有限差分等数值方法进行分析时,如何考虑土体的弹塑性、各向异性以及复杂的边界条件等特点,建立合理的模型等都是有待研究的问题.

4 结 语

由于水平荷载作用下桩土作用机理的复杂性,目前国内外虽然已提出了不少相关理论和计算方法,但都各自存在不足.此外,随着生产的发展,越来越多的新桩型被推广使用.在水平荷载作用下,这些桩型的受力特性以及原有理论对这些新桩型的适用性等都是有待进一步研究的问题.

参考文献:

[1] 何晓进.现浇混凝土薄壁管桩水平承载性状研究[D].南京:河海大学,2004.

① 刘汉龙.现浇混凝土薄壁管桩技术在沿海高速公路深层软土地基处理中的应用研究报告.南京:河海大学,2004.

- [2] 赵明华. 桥梁桩基计算与检测[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 45-52.
- [3] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. Florida: Krieger Publishing, 1991: 193-205.
- [4] POULOS H G. Behavior of laterally loaded piles: I—single piles[J]. J SMF Div, ASCE, 1971, 97(5): 711-731.
- [5] 冈部三郎. 望ましい矢板岸壁の安定算法[J]. 港湾技术, 1951, 25(3): 172-183.
- [6] BROMS B B. Lateral resistance of piles in cohesive soil[J]. J SMF Div, ASCE, 1964, 90(2): 27-63.
- [7] BROMS B B. Lateral resistance of piles in cohesionless soil[J]. J SMF Div, ASCE, 1964, 90(3): 123-156.
- [8] 胡人礼. 桥梁基础分析和设计[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1987: 67-83.
- [9] 赵明华. 桥梁桩基计算与检测[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000: 48-49.
- [10] 刘金砺. K 法计算受侧向荷载桩存在的问题[J]. 建筑科学, 1987(3): 51-56.
- [11] 杨克己, 韩理安. 桩基工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1992: 98-108.
- [12] 中国建筑科学研究院. JGJ 94—94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.
- [13] 胡立万, 周建国. 单桩水平承载力计算方法的比较分析[J]. 辽宁交通科技, 2003(4): 19-22.
- [14] 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 唐业清, 吴庆荪, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1984: 115-136.
- [15] 王伯惠. 桥梁桩基计算的统一和简化[J]. 辽宁交通科技, 1978(5): 57-60.
- [16] 竹下淳. 横荷重を受けと有限長クイの数値解法[J]. 土工技术, 1969, 24(5): 32-46.
- [17] 吴恒立. 计算推力桩的综合刚度原理和双参数法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990: 102-145.
- [18] 吴恒立. 推力桩计算方法的研究[J]. 土木工程学报, 1995, 28(2): 20-28.
- [19] 叶万灵, 时蓓玲. 桩的水平承载力实用非线性计算方法——NL 法[J]. 岩土力学, 2000, 21(2): 97-101.
- [20] 交通部第三航务工程勘察设计院. JTJ 254—98 港口工程桩基规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [21] 王梅, 楼志刚, 李建乡, 等. 水平荷载作用下单桩非线性 m 法试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(1): 23-30.
- [22] 熊辉, 邹银生. 考虑桩-土非线性共同作用的横向受荷桩分析模型[J]. 工业建筑, 2003, 33(6): 42-45.
- [23] MCCLELLAND B, FOCHT J A. Soil modulus for laterally loaded piles[J]. J SMF Div, ASCE, 1956, 82(4): 1-22.
- [24] 王惠初, 武冬青, 田平. 黏土中横向静载桩 $p-y$ 曲线的一种新的统一法[J]. 河海大学学报, 1991, 19(1): 9-17.
- [25] 田平, 王惠初. 黏土中横向周期性荷载的 $p-y$ 曲线统一法[J]. 河海大学学报, 1993, 21(1): 9-14.
- [26] 王惠初, 鲁子爱. 用 $p-y$ 曲线法计算横向荷载桩的内力[J]. 重庆交通学院学报, 1985, 15(2): 30-36.
- [27] 章连洋, 陈竹昌. 黏性土中侧向受载桩的模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(5): 40-50.
- [28] 高明, 陈锦珍. 桩在侧向静动、循环荷载下的性能研究及 $p-y$ 曲线建议公式[J]. 海洋工程, 1998, 6(3): 30-34.
- [29] 谢耀峰. 港口工程桩基水平承载力和负摩擦力研究[D]. 南京: 河海大学, 2002.
- [30] 赵明华. 倾斜荷载下桩基的受力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2001.
- [31] 谢耀峰, 王云球. 黏性土 $p-y$ 曲线中 Y_{50} 的神经网络预测[J]. 水运工程, 2005(1): 7-12.
- [32] CHEN C Y. Numerical analysis of slope stabilization concepts using pile[D]. Los Angeles California: University of Southern California, 2001.
- [33] YANG Zhao-hui, BORIS J. Numerical analysis of pile behavior under lateral loads in layered elastic-plastic soils[J]. Journal of Numerical Analysis Method of Geomechanics, 2002(2): 1-31.
- [34] ZHANG Li-min, MCVAY M C, LAI P W. Numerical analysis of laterally loaded 3×3 to 7×7 pile groups in sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(7): 936-946.
- [35] 李桐栋, 张力霆. 水平承载桩的有限元分析[J]. 河北工业大学学报, 2001, 30(5): 107-110.
- [36] 张明武. 桩基计算的边界元模拟法[J]. 中国市政工程, 1994(3): 26-28.
- [37] KUCUKARSLAN S, BANERJEE P K. Inelastic analysis of pile soil structure interaction[J]. Engineering Structures, 2003, 25: 1231-1239.
- [38] 赵伟封. 有限-边界元法在桩基工程计算中的应用[J]. 东北公路, 2000, 23(4): 80-83.
- [39] WANG Nian-xiang. Numerical analysis of interaction between pile-supported pier and bank slope[J]. China Ocean Engineering, 2001, 15(1): 117-128.
- [40] SITHARAM T G, RAJASHREE S S. Nonlinear finite-element modeling of batter piles under lateral load[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(7): 604-612.
- [41] DAVISSON M T, SALLY J R. Model study of laterally loaded pile[J]. J SMF Div, ASCE, 1970, 96(5): 1605-1627.

[42] MAYNE P W,KULHAWY F H.Laboratory modeling of laterally loaded drilled shafts in clay[J]. J Geotechnical Engineering,1995,121 (12) 827-835.

[43] PAN J L,GOH T C,WONG K S.Model tests on single piles in soft clay[J]. Can Geotech,2000,37 890-897.

[44] DYSON G J,RANDOLPH M F.Monotonic lateral loading of piles in calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2001,127(4) 346-352.

[45] 吴春林,闫明礼.CFG 桩及其复合地基水平荷载作用下的性状[J].工程勘察,1996(4) 18-21.

[46] 黄质宏.单桩水平承载力试验分析及研究[J].贵州工学院学报,1996,25(3) 42-47.

[47] 徐和,徐敏若,郑春生.单桩横向承载力试验研究[J].岩土工程学报,1982,4(3) 29-44.

[48] 李兵.短桩在粉、细砂中的垂直及水平承载力的试验研究[J].地基基础,1996(3) 28-32.

[49] 宋功河.桩基水平静力试验及其探讨[J].南昌大学学报 工科版,1996,18(3) 62-66.

[50] 赵明华,吴鸣,郭玉荣.轴横向荷载下桥梁基桩的受力分析及试验研究[J].中国公路学报,2002,15(1) 50-54.

[51] BUDHU M,DAVIES T G.Analysis of laterally loaded piles in soft clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1988,114(1) 21-39.

[52] 朱桐浩,钟小萍.侧向受荷桩与土体相互作用的分析[J].岩土工程学报,1988,10(1) 81-87.

[53] 刘汉龙,费康,郝小员,等.振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(Ⅰ) 开发研制与设计[J].岩土力学,2003,24(2) : 164-168.

[54] 刘汉龙,郝小员,费康,等.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.

Study on behavior of pile foundation under lateral loading

MA Zhi-tao

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

Abstract Based on a review of current situation about the research work, an introduction is given to some theoretical methods commonly used at home and aboard, with emphasis placed on the elastic subgrade reaction method and the p - y method as well as their characteristics and applicability, and some problems needed for further study are put forward. The present study provides a train of thought for further research on the behavior of large-diameter cast-in-place concrete pipe piles(PCC piles) under lateral loading.

Key words lateral loading ; pile foundation ; stress characteristic ; PCC pile