

群桩水平承载力计算方法研究进展

张鹤年, 刘松玉, 季 鹏

(东南大学交通学院, 南京 210096)

摘 要: 本文总结了国内外各种群桩水平承载力计算方法, 其中包括极限平衡法、工程简化法、群桩效应法、修正的 p - y 曲线法、弹性地基反力法等, 分析了各种方法的优缺点和适用范围, 介绍了国内外群桩水平承载力的研究现状和结论。

关键词: 群桩水平承载力; 计算方法; 研究进展; 适用范围

作者简介: 张鹤年(1980—), 男, 博士研究生, 主要从事高速公路路基工程, 抗-土-结构共同作用等研究。

0 引 言

桩与桩之间的受力状况与受力水平可能差异较大, 桩的力学响应也有主动桩与被动桩的区别以及两者兼而有之的复杂情况; 同时还有单桩、群桩工作性态差别较大, 群桩效应复杂等显著特征。群桩在横向荷载作用下, 桩土体系的相互关系复杂, 影响其承载力的因素较多, 现场试验与理论研究都很困难, 对群桩的研究水平还不高。

国内外水平力作用下对群桩承载力的计算方法, 大致有以下几种:

1 极限平衡法

前苏联的 B. T. 别列赞策夫将单桩的极限平衡概念引入群桩计算中, 导出了群桩容许承载力的计算公式^[1]。这种方法考虑了桩的入土深度和地基土质等情况, 但忽略了桩土相对刚度以及相互作用等重要因素, 且只能求得水平承载力, 不能计算桩的水平位移和内力, 因此适用性较小。

2 工程计算中采用的简化方法

2.1 高桩承台法

此法多应用于港口、海洋石油工程的大口径管桩的高桩承台。在求解全部由直桩组成的高桩

排架时, 文献[2]建议采用等效嵌固的概念进行计算。

港口工程桩基规范^[3]给出了等效嵌固深度的计算方法。

该法只适用于弹性长桩, 有一定近似性。由于群桩的水平地基系数较难确定, 实用不便。

2.2 低桩程台法

此法假定桩基中各桩的水平位移与承台的水平位移相等, 群桩中各桩所受到的力与该桩的刚度成正比。当各桩的抗弯刚度相同时, 群桩上的水平力平均分配。该法简单, 计算方便。但它只考虑到桩的刚度, 未考虑土的作用及桩土的相互关系。

3 群桩效应法

所谓群桩效应实际上是指单、群桩的相互影响关系, 它有几种不同含义, 主要是在同等条件下, 单桩和群桩在某一特定量值上的比值, 如: 水平力, 水平位移, 水平地基系数等几种表现形式。

在高桩码头的桩基体系中, 桩的布置大多是沿垂直于海(江)岸线的方向排成一排, 各排之间的距离一般都超过桩径的十多倍。不同桩距的单排桩内也有不同的群桩效应, 竖向荷载与水平荷载情况下, 发生群桩效应的临界桩距是不同的, 排桩或荷载作用方向的桩列中的各桩横向承载力是不均匀分配的。

经过试验研究,得出了是否考虑群桩效应的部分结果:

(1) 德国《大口径钻孔灌注桩规范》^[4]指出:当与力平行方向的桩群轴心间距大于 $8D$ (D 为桩径),与力垂直方向桩间距大于 $2.5D$ 时,所有的桩都允许使用单桩的基床系数 K_s 来计算。如果与力平行方向的桩间距为 $3D$ 时,只取用 $0.25K_s$ 来计算,当大于 $3D$,小于 $8D$ 时,可采用线性插入法计算取值。

(2) 美国混凝土学会 1973 年推荐的《钻(挖)孔桩基础设计与施工规范》第 3、5、6 条规定,当沿荷载方向的桩距大于 $8D$,垂直于荷载方向的桩距大于 $2.5D$ 时,地基土水平反力系数不予折减。

(3) 日本的横山幸满所著《桩结构物的计算方法和计算实例》^[5]指出,由试验得知,沿荷载方向不产生群桩效应的临界桩距,桩顶自由时为 $5.5B$ (B 为桩宽),桩顶完全嵌固时为 $7.8B$ 。

(4) 挪威船级社《近海建筑物的设计、施工和勘察规则》规定,当桩间距大于 8 倍桩径时,不考虑群桩效应。

上述方法给群桩的设计提供了方便,但当桩距小于规定值时,没有提出具体解决的方法,或不能反映群桩效应的本质。

(1) 根据单桩横向承载力计算群桩横向承载力。

① 日本的宫本、泽口主要考虑弹性应力传播及桩周塑性区重叠而引起的地基松弛,由玉置等在分析整理大量模型试验结果后得出了群桩效率的计算公式^[6]。玉置公式是从最大为 3 行 \times 3 列的模型试验中得到的,当桩数较多时会得出不太合理的结论。

② 山东河务局进行了一系列现场钻孔灌注桩试验,由试验结果统计分析整理出粉土地基中的以桩数 n 为参数的水平承载力群桩效率公式,文献是在特定条件下试验得出,在推广应用方面有一定局限性。

③ 日本的宫本、泽口研究认为:对横向抗力群桩效应的主要影响因素:

A: 弹性的应力传播;

B: 由于桩周围塑性区(被动区及主动区)的重叠而引起地基的松弛(更进一步的塑性化)。

这个影响是随地基条件的不同而不同的,冲积土地基上的桩结构物中,B 项因素起主要作用,

而仅以岩基为对象的桩基础中,A 项起支配作用。

他们的方法是:将直观的地表面予以降低(增大地面以上桩的自由高度 h)或降低地基系数 k 。他们认为:由于承受水平荷载的群桩发生位移,在桩前产生被动滑移面,在桩后产生主动滑移面,当考虑后桩给予前桩的影响时,将后桩前的被动滑移面与前桩相交深度,作为地表面的降低量;当考虑前桩对后桩的影响时,则将前桩主动滑移面与后桩被动滑移面的交点深度,作为地表面的降低量。

(2) 理论分析公式

① 澳大利亚的 H. G. Poulos 把桩作为半无限体中的梁,以 Mindlin 公式为依据,计算土抗力,利用桩土位移相等条件,在各种情况下用有限差分计算两根桩相互作用而引起的附加位移和转角,进行求解。

② 美国的 D. D. Lion 和 J. Penzien 根据 Mindlin 解推导出一个单独的水平集中力作用于匀质半无限空间表面下某个深度时水平位移分量,从而求得群桩效率^[7]。

上述方法都假设地基土是均匀、各向同性的半无限弹性体。实际上土是弹塑性体,尤其是桩的侧向位移较大时,土的非弹性十分明显,故上述方法与实测有较大差异。加上计算原理复杂,土的弹模与泊松比很难确定,故没有得到广泛的应用。另外,巴西的 B. E. Diaz 西班牙的 Oteo 也进行过群桩的弹性分析。

4 修正的 $p-y$ 曲线法

原型桩试验数据和模型试验资料表明:群桩中的桩在相同的荷载下将比单桩发生更大的位移,群桩的桩身位移与土的反力等工作性状有别于单桩。

Focht 和 Koch 发展了 Poulos 的方法^[8],它以 Poulos 的弹性分析为基础,结合单桩的 $p-y$ 曲线,提出用位移增大系数 Y 乘以单桩 $p-y$ 曲线中位移值 y 来考虑群桩效应。

首先对单桩用 $p-y$ 曲线法来分析,获得桩顶位移,然后用 Poulos 的相互影响参数曲线计算由于邻近桩的存在而产生的附加位移,加上单桩位移,从而获得群桩位移。对桩群中的每根桩进行上述分析,可建立一个平衡方程,联列求解这

$(n+1)$ 个方程,可得各桩所受荷载和群桩位移。

将单桩 $p-y$ 曲线中的 y 值,乘以系数 $Y=2、3、4、5$ 等,可得到一组新的 $p-y$ 曲线,进而可得到各桩相应的一组桩顶位移值;通过相关分析,即可求得桩顶位移等于群桩位移所对应的 y 值。这样,用单桩的 $p-y$ 曲线中的 y 值乘以系数 Y 就考虑到了群桩的影响。

用弹塑性理论分析单桩,用线弹性理论分析桩与桩之间的相互影响,并把这两种不同的应力应变关系叠加来分析群桩效应,显然本法比其他方法虽前进了一步但仍与实际有一定误差,且计算系数 Y 需经试算,工作量很大。

Michael McVay 和 Limin Zhang 等指出: $p-y$ 曲线中土反力 P 与桩距有关。桩距增大,土反力 P 的折减量变小。Kyle M. Rollins 和 Kris T. Peterson 等亦进行了试验,分析了单、群桩的承载力关系和土反力在一定桩距下的折减情况。

Remaud D. 等(1998)利用试验实测的弯矩分布及基于 $p-y$ 曲线来研究两根桩群桩在三种不同桩距下的群桩效应。

河海大学杨克己教授等在试验和理论分析基础上,得出了黏性土中群桩计算时桩的土反力的影响折减系数公式,实现了水平力作用下群桩计算的一大突破。

目前对横向荷载作用下大变位桩(如靠船桩、靠船墩)的工作性状,群桩在砂性土中计算时 $p-y$ 曲线中土反力影响,需要通过试验和理论分析作进一步探讨。

由于极限平衡法不能分析桩顶水平荷载作用下桩身各部分的水平位移,因此,许多学者(Reese & Matlock, 1956、Matlock & Reese, 1960、Davisson & Gill, 1963、Davisson, 1970; Reese, 2001)^[9]将 Winkler(1867)地基土模型引入到横向受荷桩的分析中,逐渐发展成目前在欧美国家广泛采用的 $p-y$ 曲线法。 $p-y$ 曲线法假定桩顶作用一水平荷载 H ,桩将产生挠曲变形,设地面以下 z 深度处的桩挠度为 y ,该薄层的土反力为 p (可通过积分求得)。这样就可以得到在水平荷载 H 作用下,任意深度 z 处土反力和横向变形之间的关系曲线($p-y$ 曲线),利用此曲线就可以分析任意水平荷载下的桩侧土体变形及桩横向承载力。这一方法综合反映了桩周土的非线性、桩的刚度和外荷载作用性质等特点。此方法的关键是如何确

定相应土层的 $p-y$ 曲线,目前常用的方法主要有室内实验法(Skempton; McClelland & Focht, 1973)和原位测试法(Reese, 1974; O'Neill & Murchison, 1983; Smith, 1983; Briaud, 1985; Robertson, 1988; Gabr, 1988; Ruesta, 1998)等。

5 弹性地基反力法

弹性地基反力法将土体假定为弹性体,用梁的弯曲理论求解桩的横向抗力。其假定地基反力 q 和桩的位移 y 的 m 次方成正比。根据指数 m 的取值不同,弹性地基反力法可以分为: $m=1$ 时的线弹性地基抗力法和 $m \neq 1$ 时的非线性弹性地基抗力法。这两者在数学上的处理方法是完全不同的。根据指定的参数不同可以分为以下几种方法:

(1) $n=0$ 时,即地基反力系数为常数,该法由我国张有龄(1937)最早提出,随后在日本得到广泛应用并推广。

(2) $n=1$,即所谓的 m 法,这种方法得出的结果是地基抗力随深度逐渐增加。Rowe (1956)、Cummings (1959)等都采用此法进行了研究。我国《建筑地基基础设计规范》(GBJ—89)、《建筑桩基技术规范》(JGJ94—94)、《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTJ024—85)均推荐使用该法。

(3) 假定桩侧土地基系数在第一弹性零点至地面间随深度增加(呈凹形抛物线),而达到第一弹性零点后保持为常数。

(4) $n=0.5$,即 C 法,假定地基抗力系数沿深度呈抛物线增加,该法最早由日本的久保浩一(1964)提出,我国陕西省交通科学研究院在分析了若干桩基的实测结果后,认为地基系数随深度按 $0.1 \sim 0.6$ 次方增大,因此提出采用 C 法,《公路桥涵地基与基础设计广泛》(JTJ024—85)在推荐 m 法的同时,也推荐了此法。

弹性地基反力法一般都是采用单参数法,单参数法的一个共同缺点是,桩在地面处的挠度、转角、桩身的最大弯矩及所在的位置等,不能很好地符合实际情况。其原因一是待定参数不够,二是参数选择不恰当,为了克服此缺点,Matlock & Reese (1960)提出采用双参数法,假定地基反力系数 $k(z) = mz^{\frac{1}{n}}$,通过调整 m 和 n 两个参数来改变 $k(z)$ 的分布图式,但是这种双参数法由于数学上

困难,而且其物理意义不明确,在过去很少采用。吴立恒(1985)对综合刚度原理和双参数法进行了理论研究,在此基础上提出了解析解,取得了较好的效果。叶万灵、时蓓玲^[10](2000)统计分析了数十根试桩的水平静载荷试验资料,提出实用非线性计算方法——NL法,《港口工程桩基规范》(JTJ254—98)局部修订时,桩的水平承载力设计推荐采用NL法。

6 总 结

本文总结了各种国内外群桩水平承载力的计算方法,其中包括极限平衡法、工程简化法、群桩效应法、修正的 $p-y$ 曲线法、弹性地基反力法等,分析了各种方法的优缺点和适用范围,介绍了国内外群桩水平承载力的研究现状和结论。

参 考 文 献

[1] 唐山铁道学院. 土力学地基和基础[M]. 北京:高等教育出版社,1957.

- [2] 日本港湾协会. 日本港口设施技术标准[S]. 北京:人民交通出版社,1980.
- [3] 中华人民共和国行业标准. JTJ254—98 港口工程桩基规范[S]. 北京:人民交通出版社,1998.
- [4] 西德标准规范 DIN4014(Teil2). 大口径钻孔灌注桩规范[S]. 上海特种基础工程研究所译,1984.
- [5] [日] 横山幸满. 桩结构物的计算方法和计算实例[M]. 唐业清,吴庆菽合译. 北京:中国铁道出版社,1984.
- [6] Tamaki O, Mitsushashi K, Tmal T. Horizontal resistance of a pile subjected to lateral load[C]. Proc. of the 4th Asian Regional Con.
- [7] Lion D D, Penzien J. 桩基的数学模拟[J]. 水运工程, 桩基工程数值计算法专辑,1980.
- [8] Focht J A, Koch K J. Rational analysis of the lateral performance of offshore pile groups[M]. OTC 1896.
- [9] Reese L C. Analysis of Laterally Loaded Piles in Weak Rock[J]. J Geotechnique Engineering. ASCE. 1997,123(11):1010~1017.
- [10] 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.