

· 地基与基础 ·



竖向弹性地基梁法与假想嵌固点法 在砂性地基高桩码头设计中的应用*

吴林键¹, 舒丹¹, 王明祥², 况曼曼¹, 李怡¹

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆市渝航交通工程有限公司, 重庆 400060)

摘要: 研究了在砂性地基中采用竖向弹性地基梁法和假想嵌固点法分别定义桩土间相互作用的边界条件。以某港口工程为例, 运用SAP2000结构分析软件, 计算、比较并分析了这两种方法模拟桩土相互作用时码头横向排架中各桩的桩身变位和弯矩值。结果表明: 在砂性地基中(桩为摩擦桩的情况), 以假想嵌固点法计算得到的结果作为设计依据的做法偏危险; 建议采用竖向弹性地基梁法, 此法更为安全可靠。

关键词: 砂性地基; 竖向弹性地基梁法; 假想嵌固点法; 桩土作用; 边界条件

中图分类号: U 652.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0155-07

Application of vertical elastic foundation beam method and illusion embedded solid point method in design of high-pile wharf in sandy foundation soil

WU Lin-jian¹, SHU Dan¹, WANG Ming-xiang², KUANG Man-man¹, LI Yi¹

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Yuhang Transportation Engineering Co., Ltd., Chongqing 400060, China)

Abstract: This paper studies the boundary conditions of interaction between the polar and the soil in sandy foundation soil, defined by the vertical beam on elastic foundation method and the imaginary fixing-points method. Based on a port project, using the structure analysis software SAP2000, we calculate, compare and analyze each pile's ultimate resistance of the pile and settlement of wharf transverse bent to simulate pile-soil interaction. The result shows that in the sandy foundation soil (when piles are friction piles), the situation which adopts the results by the imaginary fixing-points method as the design basis can be very risky. Therefore, it is suggested to adopt the method of vertical beam on elastic foundation, which is much more reliable and stable.

Key words: sandy foundation soil; vertical beam on elastic foundation method; imaginary fixing points method; pile-soil interaction; boundary condition

高桩码头作为码头多种结构形式中十分典型的一类, 是将上部结构的荷载通过桩基传递到地基土当中, 具有结构简单、砂和石用量少、对开挖超深适应能力强、波浪反射小、泊稳条件好等

优点^[1-2], 在沿海及内河港口码头中得以广泛应用。

高桩码头的桩基既是基础又是码头主体结构的组成部分, 其在承受竖向荷载(如上部结构自

收稿日期: 2012-10-08

*基金项目: 新世纪优秀人才基金项目(NCET-09-0586); 重庆市交通科学技术项目(KJXM2011-0215); 重庆市科委自然科学基金计划资助项目(CSTC 2010BB7084); 重庆市教委科学技术研究项目(KJ110410)

作者简介: 吴林键(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事港口、海岸及近海工程方面的研究。

重、堆货荷载、门机荷载)的同时还需要承受水平荷载(如船舶撞击力和系缆力作用)^[3]。尤其是在水平荷载作用下,桩的内力计算和变形分析是码头工程设计过程中非常重要却又未完全解决的问题。

由于桩基和土体之间的相互作用,使得桩基在荷载传递和发生变形的过程中呈现高度非线性力学性质^[4],在荷载作用下,桩的荷载传递机理和变形与其自身的抗弯刚度、材料强度、施加荷载的方式、以及桩侧土体的性质等因素有着十分重要的关系^[5]。

在JTS 167-1-2010《高桩码头设计与施工规范(简称高规)》^[2]中规定,横向排架按平面杆系结构计算时,桩土相互作用可按 m 法(竖向弹性地基梁法)计算,有经验时也可按假想嵌固点法计算。《高规》^[2]中也规定,根据工程经验,在进行横向排架内力计算时,按嵌固点法确定桩的计算长度一般能满足工程精度的要求。但若在砂性地基中,采用假想嵌固点法计算得到的桩内力值是否可靠,此问题值得探讨和研究。

本文基于竖向弹性地基梁法和假想嵌固点法,分别得出在砂性地基中高桩码头各桩桩身变形和桩身弯矩值,对以上两种桩土之间相互作用的边界条件方法进行对比研究。

1 假想嵌固点法

1.1 弹性长桩假想嵌固深度确定

JTJ 254-1998《港口工程桩基规范(简称港规)》^[6]中规定,当桩的入土深度 $L_i \geq 4T$ 时,该桩为弹性长桩,其中 T 为桩的相对刚度,其计算式为:

$$T = \sqrt[5]{\frac{E_p I_p}{mb_0}} \quad (1)$$

式中: E_p 为桩材料的弹性模量(kN/m^2); I_p 为桩截面的惯性矩(m^4); m 为桩侧地基土的水平抗力系数随深度增加的比例系数(kN/m^4); b_0 为桩的换算宽度(m)。

弹性长桩的受弯嵌固点深度为:

$$t = \eta T \quad (2)$$

式中: t 为受弯嵌固点距泥面的深度(m); η 为系

数,取1.8~2.2。

对于海港码头,由于沿海地质条件较好,地基大多为砂性土,高桩码头的桩基多采用打入桩,其类型也以摩擦桩或者摩擦型端承桩为主。该类桩的入土深度较大,主要依靠桩土之间的摩阻力来承受上部结构荷载,多为弹性长桩,砂性土的水平抗力系数随深度增加的比例系数 m 值在无实测资料时可在规范上直接查得,采用式(2)计算桩的受弯嵌固点距泥面的深度的方法非常方便。

1.2 软质岩层嵌岩桩嵌固深度确定

内河架空直立式高桩码头结构形式中,由于河流岸坡陡峻,地质条件为持力层良好的岩层,高桩码头的桩基多采用嵌岩桩,该类桩主要为端承桩或端承型摩擦桩,其入土深度远小于摩擦桩,约进入中风化岩层3~5倍桩径。对于嵌岩桩嵌固点位置的确定,由于现有规范上缺乏有关于各类基岩 m 值具体数据,如若按式(2)的方法进行计算,在实际操作中存在困难。

王多垠等^[7-8]研究了在水平荷载作用下,嵌岩桩周围岩体的塑性区深度与桩嵌固深度之间的关系曲线,结果表明:当水平荷载、桩基、岩体结构一定时,桩的嵌固深度存在两个具有物理意义的特征点,分别被命名为最小嵌固深度和临界嵌固深度。为保证地基对桩的嵌固作用,桩体的实际嵌固深度应不小于桩的最小嵌固深度,并接近临界嵌固深度值。同时,兰超^[8]推导得到用于软质岩中原型桩最小嵌固深度和设计嵌固点深度的公式(式中各自参数计算详见文献[8]):

$$H_{r1} = (0.04M/Q) nsm_b \quad (3)$$

$$H_r = H_{r1} K_c \quad (4)$$

式中: H_{r1} 为最小嵌岩深度; H_r 为设计嵌岩深度; Q 为基岩顶面处桩身剪力设计值; M 为基岩顶面处桩身弯矩设计值; n 为岩体模量修正系数; s 为水平荷载修正系数; m_b 为最小嵌固深度的桩径修正系数; K_c 为综合修正系数。

通过计算验证,现行港航设计规范^[6,12-14]公式的计算结果与本文式(3)和(4)计算结论间存在着较好的一致性,可用于确定软质地基岩层中嵌岩桩嵌固深度^[7-9]。

2 竖向弹性地基梁法

竖向弹性地基梁法是将桩基看作竖直放置于弹性地基中的基础梁,其中埋入土中的部分将承受土抗力作用,该土抗力可通过一系列彼此孤立的弹簧来表示,从而模拟桩土相互作用的边界条件,而弹簧压缩系数就是土抗力系数,在计算板桩码头中得以广泛应用^[10-11]。竖向弹性地基梁法可分为 m 法、 c 法、 k_0 法,分别表征了土抗力系数沿土层深度的不同分布规律,但在工程实践过程中最为常用的方法为 m 法^[11]。

根据《港桩规》^[6]的规定, m 法假定土的水平地基抗力系数 K 随深度成线性增加,即:

$$K=mZ \quad (5)$$

式中: m 为土的地基抗力系数随深度增长的比例系数(kN/m^4); Z 为计算点的深度(m)。

在实际工程设计中,采用竖向弹性地基梁法进行计算,其优点是桩土之间相互作用的边界条件与实际情况符合程度较高,当桩基入土部分的任意一段出现水平位移时将受到土体弹簧的约束,其约束程度与桩基水平位移的大小、桩在泥面以下深度成正相关。

本文就竖向弹性地基梁法和假想嵌固点法对同一码头结构在砂性地基中分别计算,得到一个典型横向排架中各桩的桩身变形和弯矩值大小,为优化码头结构设计方法,针对不同地质条件选取相应的桩土边界条件提供参考。

3 实例探讨

3.1 工程概况

某港为其国唯一的国际商业贸易海域通道,该港区地处沿海地带,地形断面呈上陡下缓,岸线平缓,但海岸后方地势起伏较大,地质条件属于典型的中东沙漠地区状况,地基土大部分为砂性土,地质条件较单一。经钻探揭露,勘区范围内地基土分布较为稳定。由于该城市岸线长度的限制,结合该地区地质条件良好等各方面因素,建港过程中将涉及大量土方开挖,形成一个大型的挖入式港池,以满足万吨级及以上大型船舶的需要。

该港共设2个泊位,其一为8万吨级大型专业化散货泊位,主要针对该国散粮谷物的进口作业;其二为7万吨级大型专业化集装箱泊位。码头结构形式均为高桩梁板式,基桩采用钢管桩,从下至上依次为横梁、纵梁、面板。本文以8万吨级散粮码头前方桩台的1个结构段作为算例,码头总长270 m,分为4个结构段,其总宽度31.52 m,其中前方桩台宽度为18.5 m。图1和2为该结构段的三维立体模型和高桩码头结构断面图。该码头横向排架间距10 m,用于计算的结构段总长65 m,共6跨7个排架。



图1 码头结构段三维模型

3.2 模型建立

计算过程中,采用结构通用有限元分析软件SAP2000^[20]建立码头结构三维空间模型辅助计算,建模过程中,将桩基、纵梁、横梁全部建为杆件单元,分别定义每一根桩基所对应杆件单元的边界条件、材料和截面,再在各框架或节点上施加相应使用荷载后,SAP2000将迭代计算得到各构件的内力值大小。该工程前方桩台的桩基均采用直径1.2 m且壁厚为20 mm的钢管桩,纵、横梁均采用C30的钢筋混凝土构件。下面就分别阐述在SAP2000中实现竖向弹性地基梁法和假想嵌固点法模拟桩土相互作用边界条件的操作过程。

3.2.1 竖向弹性地基梁法定义边界条件

该地区的地基土体主要为中粗砂的砂性地基,可在《港桩规》^[6]中查阅得到中粗砂的 m 值大小,再根据式(5)计算得到砂性地基土的水平地基抗力系数 K 随深度成线性增加的各点处相应数值。

在SAP2000模型中,用竖向弹性地基梁法模拟桩土之间的相互作用可通过在桩入土部分各节

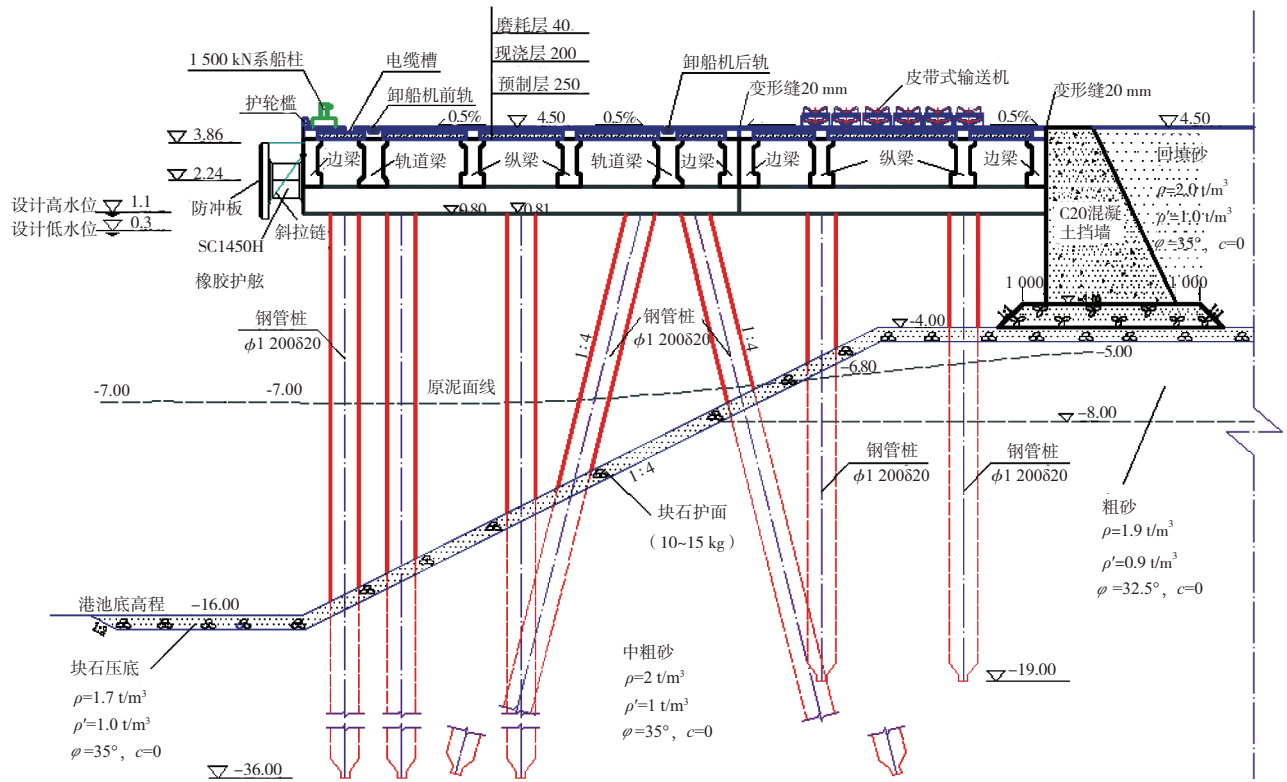


图2 高桩码头断面

点上施加沿指定坐标方向的弹簧来得以实现，因此，建模时就必须计算各节点处各弹簧的线弹性支承刚度^[15]，其值为：

$$C=KA \quad (6)$$

式中： K 为水平地基抗力系数； A 为相应节点的有效投影面积(m^2)。

很显然，当节点的有效投影面积一定的情况下，弹簧的线弹性支承刚度也是随着入土深度的增加而呈线性变化。

本算例模型中每根桩的实际桩长为37 m，将每根桩所对应的框架单元平均分割为37个单元，每个单元长1 m，共38个节点，可通过式(5)和(6)计算得到各个节点处弹簧的线弹性支承刚度值大小，分别指定各节点处各方向的弹簧刚度，即可定义竖向弹性地基梁法对应的桩土相互作用边界条件(需考虑桩刚入土部分1~2 m的土体扰动)。图3所示为该法定义边界条件的模型。

3.2.2 假想嵌固点法定义边界条件

根据桩的各材料力学参数和式(1)，可计算得到桩的相对刚度 $T=2.21$ m，在SAP2000模型中桩的实际桩长为37 m，根据图2可知，入土深度最小

的一根桩 $L_i=21$ m，显然， $L_i>4T$ ，因此该模型中所有的桩均为弹性长桩。

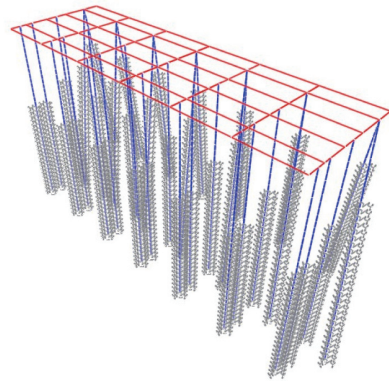


图3 竖向弹性地基梁法定义边界条件的模型

根据式(2)计算得到各桩受弯嵌固点距泥面的深度 t 的大小，再加上泥面以上各桩的桩长，即可得到各桩的假想受弯嵌固点的位置。图4为SAP2000中定义假想嵌固点法所对应的桩土相互作用边界条件的模型。

3.3 作用效应

《高规》^[2]中规定，高桩码头结构按照承载能力极限状态中持久状况作用效应的持久组合以及正常使用极限状态中持久状况作用效应的标准

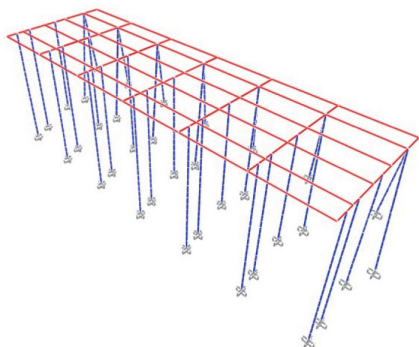


图4 假想嵌固点法定义边界条件的模型

组合对各荷载工况来进行组合。由于本文主要是探讨桩在水平荷载作用下, 竖向弹性地基梁法和假想嵌固点法所定义的桩土相互作用的边界条件对高桩码头各桩桩身位移和弯矩的影响。因此, 选择当排架承受船舶撞击力的情况作为计算工况。根据JTS 144-1-2010《港口工程荷载规范》^[16]可计算得到船舶撞击力为 $F=1\ 400\ \text{kN}$, $M=917\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 。

本文运用SAP2000结构分析软件计算得到码头横向排架在船舶撞击力作用的承载能力极限状态时, 用假想嵌固点法和竖向弹性地基梁法所定义的不同边界条件下各桩的内力值, 用以相互对比分析。

3.4 计算结果分析

3.4.1 横向排架及桩编号

在SAP2000码头前方桩台结构模型中共有7个排架, 各排架下均设5根桩, 共计35根桩, 由于本文篇幅有限, 不能将每根桩的计算结果逐一统计分析。本着在水平荷载作用下最不利原则, 选择一个典型横向排架下的某几根桩作为分析依据。如图5和6所示, 将码头结构段三维模型中的各个横向排架及各排架中的每一根桩逐一编号。

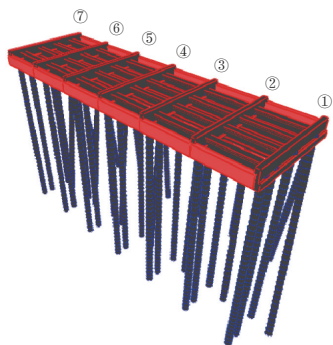


图5 横向排架编号

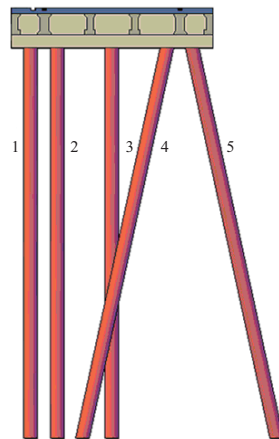


图6 桩的编号

码头横向排架中各桩按照“排架号-桩号”命名, 例如①号排架下的第1根桩即被命名为“桩1-1”, 以此类推。由于①号排架处于最边缘位置, 在定义荷载作用时, 是将船舶撞击力和系缆力都作用到①号排架节点上, 因此, ①号排架为各排架中最不利排架。据计算结果可知, 由于1, 2, 3号桩均为直桩, 采用假想嵌固点法和竖向弹性地基梁法所定义的不同边界条件所计算得到的桩内力值变化趋势一致, 故只需选择其中1根桩进行分析即可。而4, 5号桩为一对叉桩, 为承受水平荷载的主体, 最终选择对桩1-1、桩1-4和桩1-5这3根桩的结果进行分析。

3.4.2 P-Y曲线法论证

P-Y曲线法是将桩侧水平地基反力与土的三轴不排水试验所得的应力-应变曲线的相互关系加以比较, 按照实际土的应力-应变关系计算桩身变形和内力的方法^[17]。在此方法中, 水平荷载所引起的土反力是由P-Y曲线来描述。沿着桩身各深度处的P-Y曲线是用于表达桩-土体系之间的应力-应变关系性状。采用此方法充分考虑了土的非线性, 适用于任意尺寸、嵌固状态、刚度的桩在发生了弹、塑性变形以及剪切破坏时桩身的变形及位移计算^[17-18]。

文献[18]中详细介绍了单桩P-Y曲线的计算方法, 但由于在本算例中, 组成码头结构段的群桩在承受水平荷载作用时, 其内每根桩的性状与单独的一根桩承受水平荷载时相比有区别, 群桩中的每根桩之间具有相关性^[17]。这在P-Y曲线中体现

为：与独立单桩相比，群桩中各桩桩身需要更大的变形才能得到相同的土反力，而土体作用在桩身的最大反力值降低，即产生群桩效应。由于群桩中各桩之间的相互作用，需要对单桩的P-Y曲线加以修正。

Reese L C等^[19]在对群桩的P-Y曲线研究中，得到水平地基反力折减系数e来对各单桩的P-Y曲线修正。在本算例中采用得到的相应折减系数公式进行计算：

$$e=0.7(s/d)^{0.26} \quad (7)$$

式中：s为桩距(m)；d为桩直径(m)。

应用式(7)结合文献[18]中的方法，在船舶撞击力作用下计算并绘制得到了桩1-1、桩1-4和桩1-5各不同深度的P-Y曲线。图7为桩1-1的P-Y曲线图(修正后)。

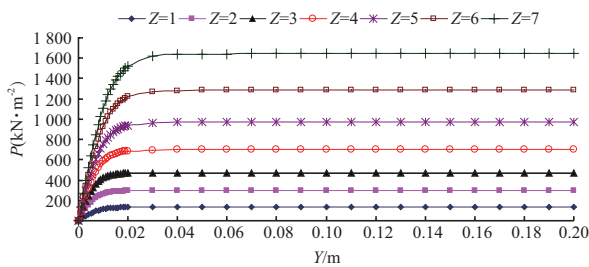


图7 P-Y曲线(修正后)

应用绘制得到的P-Y曲线可计算得出各桩各深度处桩的水平位移和桩身弯矩。图8~13为桩1-1、桩1-4、桩1-5在撞击力作用下，假想嵌固点法、竖向弹性地基梁法和P-Y曲线法计算得到的桩身变形和弯矩图。图14为①号排架中各桩桩顶的变位值统计。

从图中可知，各桩弯矩值的峰值均为采用竖向弹性地基梁法计算所得的结果。由此可知，在砂性地基中，若采用假象嵌固点法计算得到的结

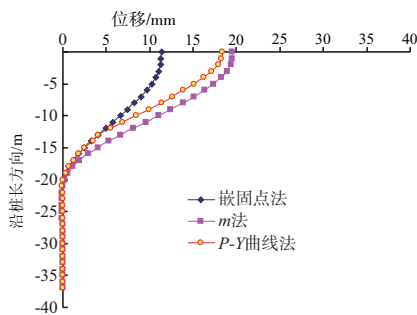


图8 桩1-1水平位移沿深度分布

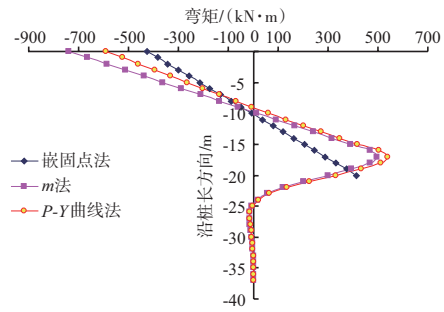


图9 桩1-1桩身弯矩沿深度分布

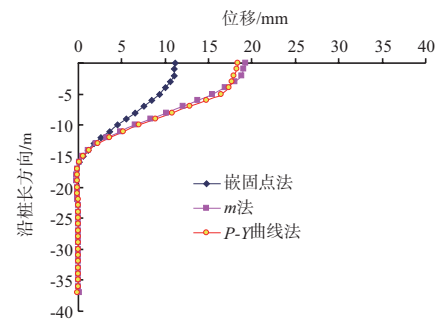


图10 桩1-4水平位移沿深度分布

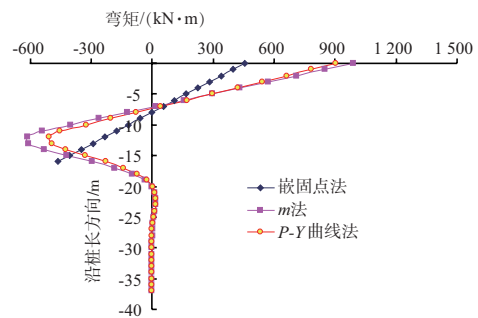


图11 桩1-4桩身弯矩沿深度分布

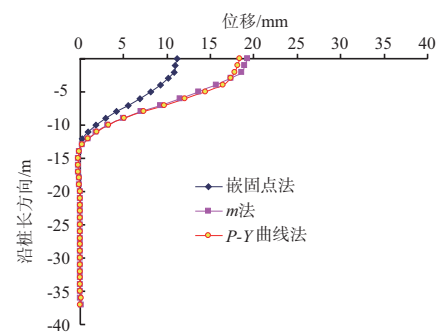


图12 桩1-5水平位移沿深度分布

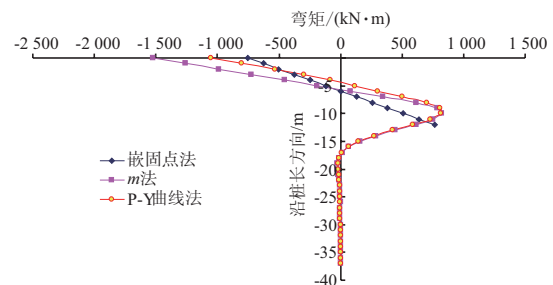


图13 桩1-5桩身弯矩沿深度分布

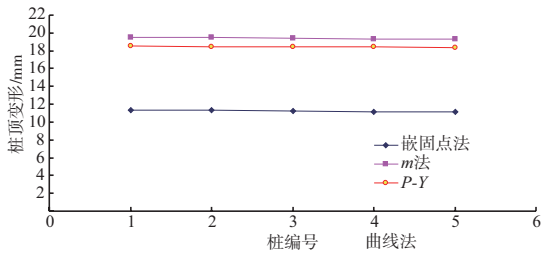


图14 ①号排架中各桩桩顶的变位

果作为设计依据, 相比于竖向弹性地基梁法, 这种做法偏危险, 应采用竖向弹性地基法作为设计依据更为安全可靠。

4 结论

基于竖向弹性地基梁法和假想嵌固点法为理论依据, 分别应用于砂性地基条件下高桩码头横向排架承受水平荷载作用下的桩力计算, 对这两种定义桩土之间相互作用边界条件的理论方法进行对比研究。以某港口工程项目为例, 运用SAP2000结构分析软件, 计算、比较并分析了这两种方法模拟桩土相互作用时码头横向排架中各桩的桩身变位和弯矩值。结果表明: 在砂性地基中(桩为摩擦桩的情况), 采用假想嵌固点法计算得到的结果作为设计依据的做法偏危险, 建议应采用竖向弹性地基梁法作为设计依据更为安全可靠。

参考文献:

- [1] 邱驹. 港工建筑物[M]. 天津: 天津大学出版社, 2002.
- [2] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [3] 张忠苗. 桩基工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [4] 李自林, 姚军, 李拥军, 等. 水平受荷桩性能的有限元分析[J]. 天津城市建设学院学报, 2011, 17(2): 86-89.

- [5] Zhang Lianyang, Silvaf, Grismalar. Ultimate lateral resistance to piles in cohesionless soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005(1): 78-83.
- [6] JTJ 254—1998 港口工程桩基规范[S].
- [7] 王多垠, 兰超, 何光春, 等. 内河港口大直径嵌岩灌注桩横向承载性能室内模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007(3): 1 307-1 313.
- [8] 兰超. 内河港口大直径嵌岩灌注桩横向承载性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学海河学院, 2005.
- [9] 黄建勇, 王多垠, 汪承志. 考虑节理分布的内河港口大直径嵌岩灌注桩横向承载性能研究[J]. 水运工程, 2008(3): 59-63.
- [10] 刘建起. 竖向弹性地基梁法中的锚碇点位移计算[J]. 中国港湾建设, 2000(4): 27-31.
- [11] 陆东汉. 板桩桩身结构计算问题的探讨[J]. 水运工程, 2008(10): 99-103.
- [12] JTS 147-1—2010 港口工程地基规范[S].
- [13] JTJ 285—2000 港口工程嵌岩桩设计与施工规范[S].
- [14] JTJ 248—2001 港口工程灌注桩设计与施工规程[S].
- [15] 彭俊生, 罗永坤. 结构概念分析与SAP2000应用[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005.
- [16] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [17] 龚健, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 微型桩原型水平荷载试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(20): 3 541-3 546.
- [18] 杨克己. 实用桩基工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [19] Reese L C, Vanimpe W F. Single pile and Pile Groups under Lateral Loading[M]. Rotterdam: A A Balkema, 2001.
- [20] SAP2000 software trial. Download from: [http://www.csiberkeley.com/support/downloads/software-updates\[CD\].](http://www.csiberkeley.com/support/downloads/software-updates[CD].) Computers and Structures, INC. structural and earthquake engineering software.

(本文编辑 武亚庆)

