

·地基与基础·



高桩墩台桩土共同作用对结构内力的影响*

乔保娟¹, 刘天苹¹, 李世海¹, 林青², 侯岳峰¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;

2. 中交第二航务工程勘察设计院有限公司广州分公司, 广东广州 511442)

摘要: 根据广州某高桩墩台结构断面图和土层参数勘察报告, 建立了包含墩台、桩基及土层的三维有限元模型。桩土界面采用面面接触模型, 允许桩土分离及滑移, 通过接触应力反映桩基土对桩的侧压力和摩阻力。分析得出了高桩墩台在多种荷载组合下的应力场和位移场, 以及各桩的弯矩图和轴力图。并进一步将有限元结果与以丰海高桩墩台计算程序为代表的传统嵌固点法计算结果相比较, 分析了2种方法单桩轴力图、弯矩图的差异及原因, 同时分析了桩基土对结构内力的影响, 得到桩排中的最大轴力弯矩桩的位置及单桩上轴力弯矩极值点的位置, 为传统的嵌固点法计算结果提供了一些修改与补充, 从而为高桩墩台结构设计提供参考。

关键词: 高桩墩台; 有限元; 三维受力分析; 桩土作用

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2011)08-0115-07

Influences of pile foundation soil on structural internal force in high-pile pier

QIAO Bao-juan¹, LIU Tian-ping¹, LI Shi-hai¹, Lin-Qing¹, HOU Yue-feng¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Guangzhou Branch, CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511442, China)

Abstract: According to the soil parameters from the survey report and the structural construction drawings of a high-pile pier in Guangzhou, this paper establishes a three-dimensional finite element model of the high-pile pier, including the platform, piles, and soil. The surface-to-surface contact model is used on the pile-soil interface, and it allows separation and slip on the interface. The normal pressure and friction from the soil to the piles are reflected by the contact stress. This paper analyzes and figures out the stress fields and displacement fields of the high-pile pier, as well as the axial force diagram and moment curve of single pile, under various load combinations. Further, this paper compares the finite element method results with the traditional inserting point method results, taking Fenghai high-pile pier computing program for example. The differences of the axial force diagram and moment curve of single pile of both methods are found out and analyzed. Specifically, the impacts of the pile foundation soil on the structure are analyzed. Meanwhile, this paper finds out the pile which has the maximum internal force and the position where the extremum bending moment and axis force appears in a single pile, and provides some modifications and supplements for the results of the traditional inserting point method, which may provide references for structural design of high-pile pier.

Key words: high-pile pier; finite element method; three-dimensional force analysis; pile-soil interaction

收稿日期: 2011-02-16

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB731500); 国家自然科学基金重点项目(10632100); 中国科学院重要方向性项目(KJ951-A1-01)

作者简介: 乔保娟(1987—), 女, 硕士研究生, 从事高桩码头桩与岸坡相互作用研究。

高桩墩式桩台是深水开敞域码头的一种重要结构形式，过去通用的计算方法是根据工程实际情况假定结构下部桩两端为铰接或固接，而结构上部为刚性桩台进行计算。对于桩基土对上部结构的位移和内力的影响，则通过嵌固点假设近似考虑。即假想在泥面下某一深度为受弯假想嵌固点，并以此梁式杆件代替实际的桩，在保证桩顶横向刚度基本一致的前提下确定出嵌固点深度^[1]。而桩的轴向刚度在无试桩资料时，采用基于轴向极限承载力的经验公式估算。以上这些做法所得到的计算结果与实际情况的差异早为人们所认识，引起普遍的关注^[2]。高性能微机和大型商用有限元软件系统的出现，使人们可以对墩式桩台这种大型的工程结构建立三维空间有限元模型进行计算。有限元方法不但可以进行三维协同受力分析，而且可以较为真实地模拟桩土相互作用，显示了巨大的优越性。

文章通过对比有限元方法与传统的嵌入点方法(以丰海高桩墩台计算程序为例)计算结果的差异来研究桩基土对结构内力的影响。根据某高桩墩台的工程资料建立了三维有限元模型，计算出高桩墩台在多种荷载组合下的应力场、位移场，绘制了各桩的轴力图 and 弯矩图，并将计算结果与传统嵌固点方法的相应结果进行比较，提出了一些有益的结论。

1 计算模型的建立

所研究的码头采用无锚板桩墙结构。码头面高程 6 m，宽 8 m，采用现浇 C40 混凝土结构。板桩墙采用 $\phi 1\ 000$ 灌注型嵌岩桩，桩与桩间距 1.1 m，两桩岸侧位置处设置 $\phi 500$ 水泥搅拌桩密实桩间空隙；平台岸侧增设 $\phi 1\ 000$ 灌注桩，桩与桩间距 3 m。码头断面见图 1。

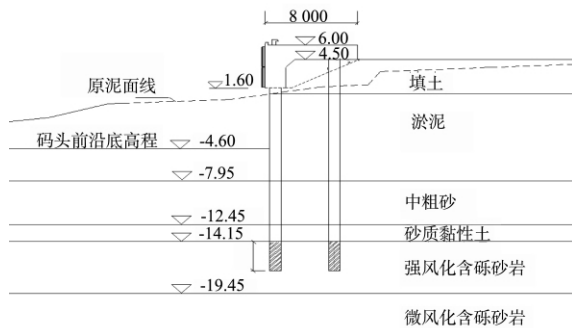


图 1 码头断面

1.1 三维几何模型的建立

严格地依据码头结构几何尺寸，建立高桩墩台一个结构段的三维数值模型。总体直角坐标系： X 轴正向为垂直码头前沿线，向岸方向， Y 轴正向竖直向上，由右手坐标系确定 Z 轴正向。计算模型的取值范围：在高度方向上，向下取桩以下 1 倍平台宽；水平方向取 1.5 倍平台宽。模型 X 方向尺寸 68.1 m， Y 方向尺寸 28.4 m， Z 方向尺寸 64.5 m。平台、桩和土层都采用六面体单元划分，单元数目为 18 874，如图 2，3 所示。边界条件为：土层下底面固定约束，其余侧面法向约束。平台与桩绑定约束；桩与土层间设置面面接触。

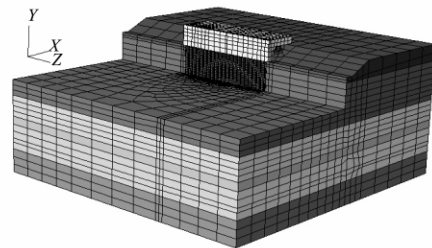


图 2 整体网格模型

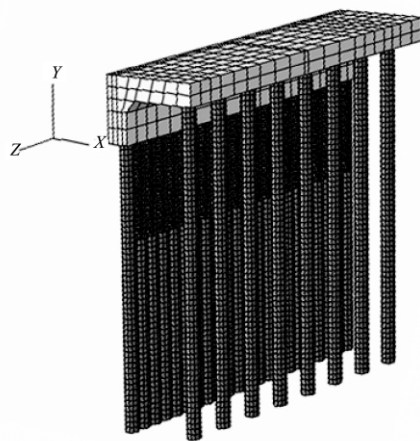


图 3 桩台网格模型

1.2 荷载及材料参数选取

计算荷载取值如下：

- 1) 码头面均载：10 kPa；
- 2) 船舶系缆力：码头采用 150 kN 系船柱 (共 3 个)，系缆力各方向分值为： $N_x = -125.5$ kN (垂直码头前沿线，离岸向)， $N_y = -38.8$ kN (垂直码头面，向下)， $N_z = 72.4$ kN (平行码头前沿线方向)；
- 3) 船舶撞击力：码头采用 D400×400×1 000

橡胶护舷, 设计吸能为 19.6 kJ, 设计反力为 441 kN; 加在相邻 2 个护舷上。

物理模型的材料分区及其主要物理力学参数见表 1。

表 1 材料参数取值

模型材料	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性 模量/MPa	泊松比	粘聚 力/kPa	摩擦角 /(°)
平台	2 500	3.25×10 ⁴	0.167		
板桩	2 500	3.00×10 ⁴	0.167		
水泥搅拌桩	2 500	3.00×10 ⁴	0.167		
人工填土	1 850	3.00	0.280	12.8	10.10
淤泥	1 540	3.00	0.340	5.3	3.36
中粗砂	1 950	40	0.250	0.0	30.00
砂质黏性土	1 950	40	0.250	21.8	11.80
强风化含砾 砂岩	2 100	100	0.220		
微风化含砾 砂岩	2 000	4.00×10 ⁴	0.200		

2 计算结果分析

分别计算了承载能力极限状态持久组合、正常使用极限状态持久状况的短期效应(频遇)组合和正常使用极限状态持久状况的长期效应(准永久)组合下的 5 种荷载组合: 组合 1 为永久荷载+均布荷载; 组合 2 为永久荷载+船舶系缆力; 组合 3 为永久荷载+船舶撞击力; 组合 4 为永久荷载+均布荷载+船舶系缆力; 组合 5 为永久荷载+均布荷载+船舶撞击力。对于活荷载多于一种的组合, 分别研究各活荷载作为主要荷载的情况。各工况下荷载分项系数、组合系数等按港工规范选取。

2.1 应力与位移分析

计算得出不同荷载组合下结构的应力与位移分布, 很好地吻合了高桩墩台实际结构中的应力、位移分布状况, 现以承载能力极限状态持久组合下荷载较为复杂的组合 4 为例, 说明高桩墩台结构的内力及位移分布状况。

由板桩和岸侧桩 3 个方向应力图可知, 板桩主要受轴向压力, 最大压应力值为 2.508 MPa。图 4 为板桩轴向应力, 图 5 为岸侧桩轴向应力。

由图 4 和 5 可知, 同排桩轴向应力大小、分布相近; 从桩顶到桩底应力逐渐增大; 岸侧桩比板桩轴向应力大。通过应力图可以直观地找到高

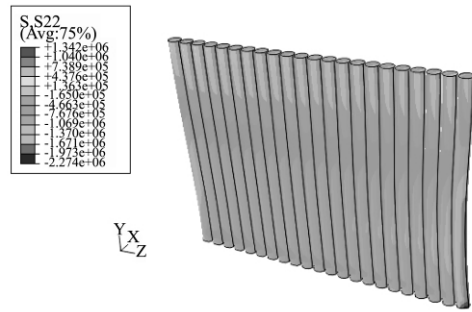


图 4 板桩轴向应力

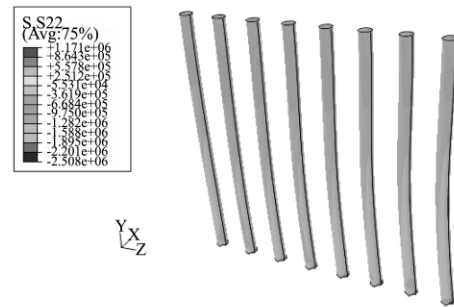


图 5 岸侧桩轴向应力

桩墩台应力关键控制点, 以及结构各点应力量值, 可以方便地通过应力来设计结构截面。同时, 应力图也为结构关键部位的应力校核提供了方便。

图 6~11 为板桩和岸侧 3 个方向的位移场分布。

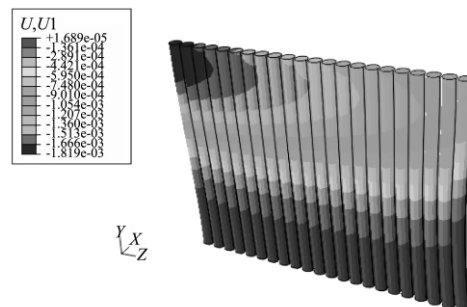


图 6 板桩 X 向位移

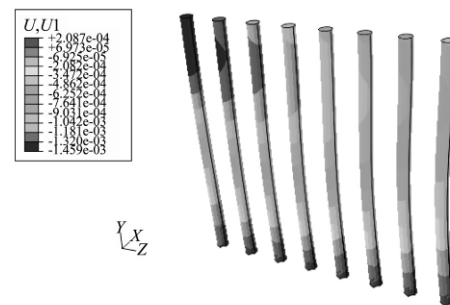


图 7 岸侧桩 X 向位移

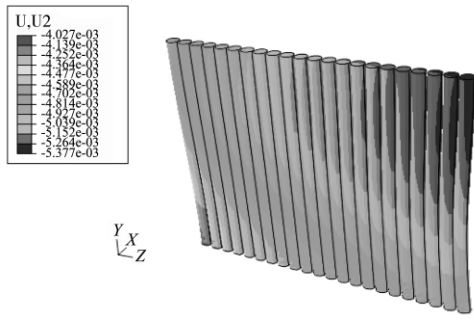


图 8 板桩 Y 向位移

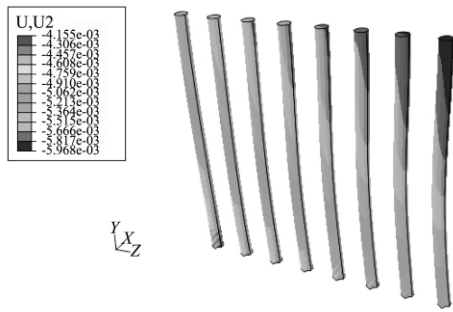


图 9 岸侧桩 Y 向位移

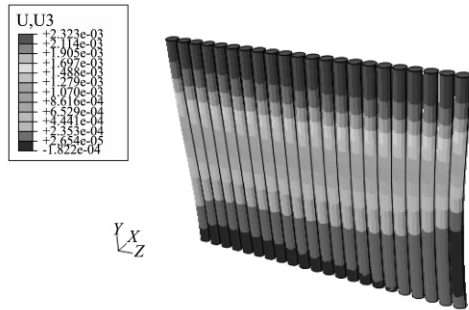


图 10 板桩 Z 向位移

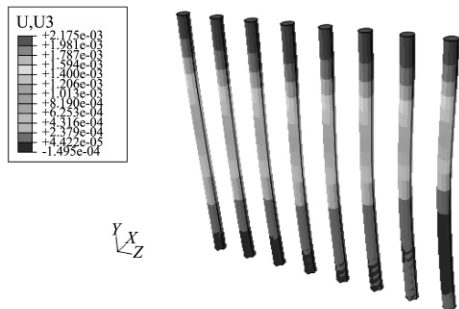


图 11 岸侧桩 Z 向位移

由板桩和岸侧桩位移图可知，桩主要位移为竖向沉降，最大沉降值为 5.968 mm。在系缆力的作用下，桩顶发生向海侧位移和顺岸位移，桩底几乎无位移。可见，由位移图可以直观地看出结构的水平位移和竖向沉降状况，为快速找到结构大位移部位提供了方便。

2.2 轴力弯矩分析

2.2.1 全部桩轴力弯矩分析

为了便于研究桩的内力值，每根桩取 20 个取样点，从桩顶到桩底均匀分布。在 Abaqus 软件基础上进行二次开发，输出所有桩的取样点的轴力和弯矩，并绘图。总结各荷载组合下 30 根桩的轴力图 and 弯矩图得到了以下结论：

1) 轴力：同一荷载组合下，各桩轴力分布趋势基本一致，最大值在靠近桩底处，边桩的轴力稍大，岸侧桩轴力比板桩稍大。不同荷载组合下，单根桩轴力分布趋势基本相似，但数值上有较大区别。

2) 弯矩：同一荷载组合下，同排各桩弯矩分布趋势基本一致且大小相近，但不同排桩弯矩大小、形状均差别较大。不同荷载组合下，单根桩弯矩分布趋势和弯矩极值区别均较大。

将有限元计算结果与传统的嵌固点法（以丰海高桩墩台计算程序为例）计算结果比较，可得：

1) 轴力：对于大多数组合，有限元计算结果比嵌固点法计算结果偏小。以承载能力极限状态持久组合的组合 4（均布荷载为活荷载）为例，绘制轴力(图 12)，横轴为 30 根桩，1~22 号桩为板桩，22~28 号桩为岸侧桩，纵轴为每根桩轴力最大值。

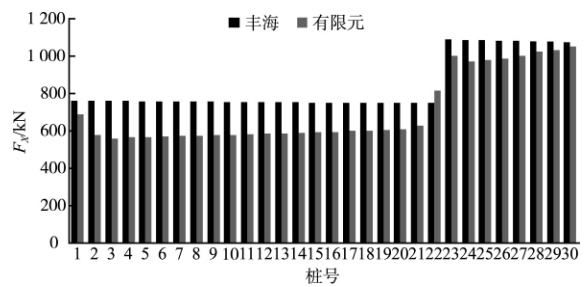


图 12 有限元与嵌固点法轴力对比

2) 弯矩：对于不同荷载组合，有限元计算结果与嵌固点法计算结果相比大小不确定，规律性不明显。比如对于承载能力极限状态持久组合的组合 4，有限元计算结果与嵌固点法计算结果 Y 向弯矩最大值相差不大，而 Z 向弯矩最大值却小很多 (图 13, 14)。对于承载能力极限状态持久组合的组合 1，有限元计算结果与嵌固点法计算结果 Y 向弯矩最大值大，而 Z 向弯矩最大值却小很多。

但总体来说, 有限元计算结果在各荷载组合下 Y 方向、 Z 方向弯矩最大值基本为几十 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 量级, 且 Y 方向和 Z 方向弯矩相差不大。而嵌固点法计算结果在各荷载组合下 Y 方向、 Z 方向弯矩最大值变异性很大, 从 $0.1 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 量级到几百 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 量级不等, 且 Y 方向和 Z 方向弯矩相差很大。可见, 有限元方法更好地发挥了桩台的空间协同工作特性。

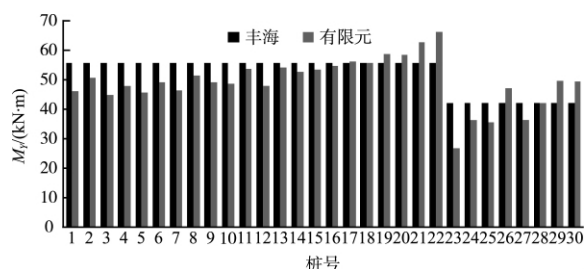


图 13 有限元与嵌固点法 Y 向弯矩对比

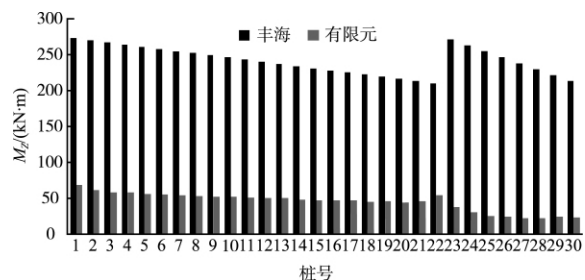
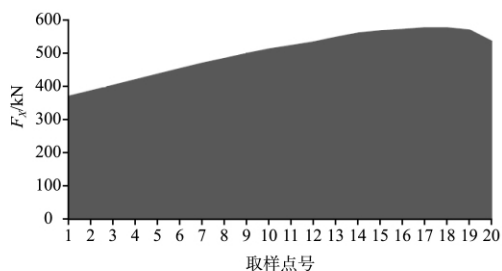


图 14 有限元与嵌固点法 Z 向弯矩对比

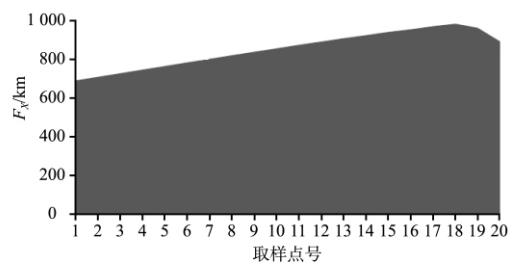
2.2.2 单根桩轴力弯矩分析

由于同排桩轴力弯矩图相似性较好, 以承载能力极限状态持久组合的组合 4 为例, 分别取板桩和岸侧桩的中间桩, 分析有限元和嵌固点法单桩轴力图、弯矩图区别。图 15~17 中, 有限元计算结果横轴为桩顶到桩底均匀分布的 20 个取样点, 嵌固点法计算结果横轴为桩顶到桩底均匀分布的 5 个取样点, 纵轴为轴力 (弯矩) 值。

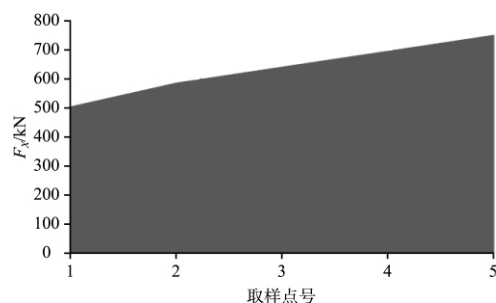
可见, 有限元计算结果最大轴力点在 18 号取样点, 即约高程 -15 m 处 (大约在砂质黏性土和



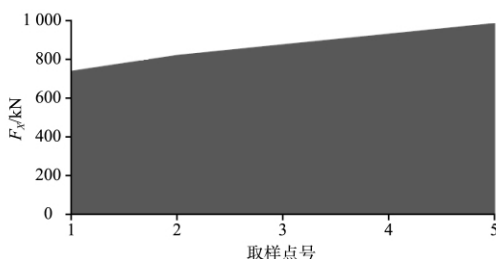
a) 板桩有限元法



b) 岸侧桩有限元法



c) 板桩嵌固点法



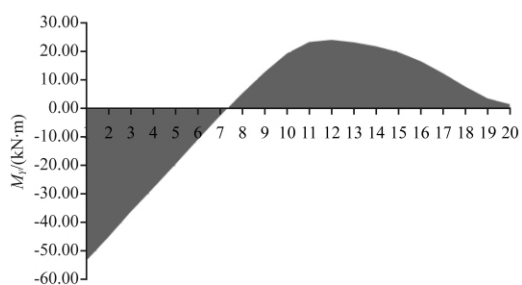
d) 岸侧桩嵌固点法

图 15 有限元与嵌固点法单桩轴力比较

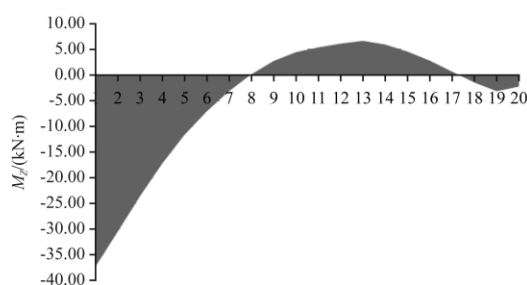
强风化含砾砂岩分界处), 桩底轴力比最大值略有减小; 嵌固点法计算结果最大轴力出现在桩底。

原因分析: 有限元建立了桩土共同作用模型, 桩采用真实尺寸, 桩土界面采用面面接触模型来分析土体对桩的摩阻力。轴力图中高程 -15 m 以下桩轴力减小, 说明了桩进入强风化含砾砂岩后, 摩阻力急剧增大, 超过了重力增大的速度。而嵌固点法将嵌固点下桩与土体合成为一个大的支座, 假定在桩顶和嵌固点处固接, 没有考虑土体对桩摩阻力随高程变化状况。

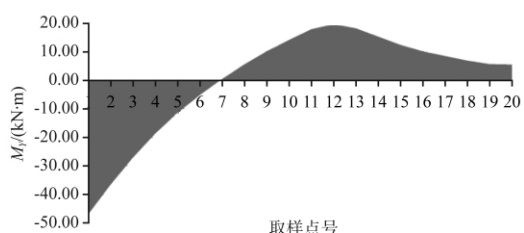
由图 16 和图 17 可见, 有限元计算结果桩底弯矩接近零, 弯矩极值多数工况下出现在桩顶和高程大约 -8.5 m 处 (大约在淤泥和中粗砂分界处), 与实际情况相符; 嵌固点法弯矩极值出现在桩顶和桩底。



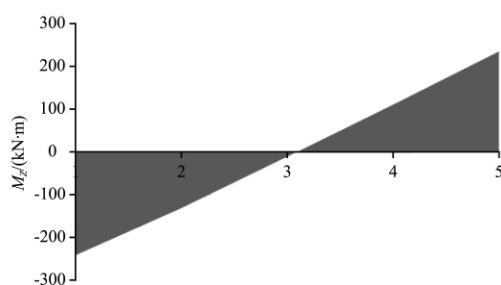
a) 板桩有限元法



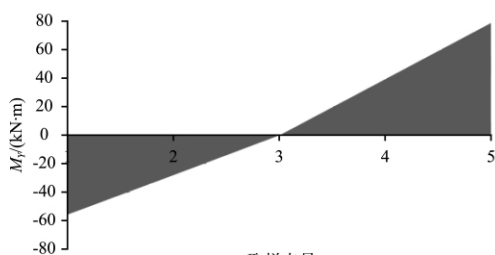
b) 岸侧桩有限元法



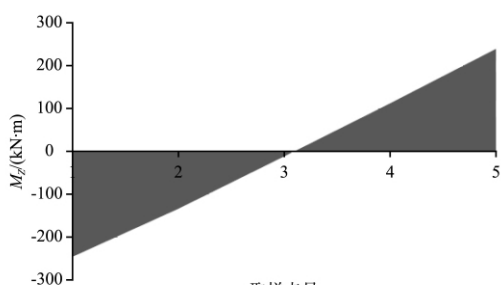
b) 岸侧桩有限元法



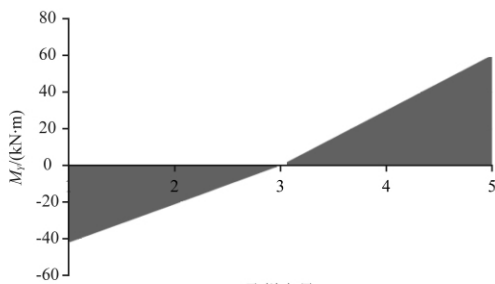
c) 板桩嵌固点法



c) 板桩嵌固点法

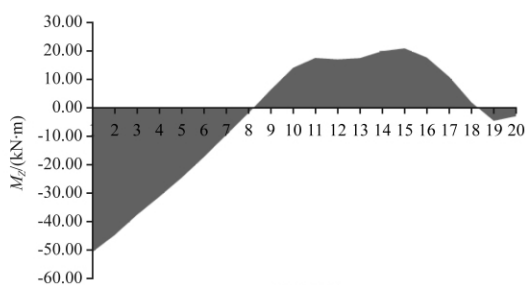


d) 岸侧桩嵌固点法



d) 岸侧桩嵌固点法

图 16 有限元与嵌固点法单桩 Y 向弯矩比较



a) 板桩有限元法

图 17 有限元与嵌固点法单桩 Z 向弯矩比较

原因分析：有限元考虑了土体对桩的摩阻力和侧压力，能够计算出不同土层对桩的摩阻力和侧压力随桩长的分布，整个桩体都有弯矩存在；以丰海软件为代表的嵌固点法没有建立土体模型，不能计算出不同土层对桩的摩阻力和侧压力随桩长的分布，它假定在桩顶和嵌固点处固接，实际上不存在真实的嵌固点，嵌固点以下的桩体也应有弯矩。用有限元计算得到的弯矩分布更合理，其算得的弯矩也较小。

3 结语

建立了某高桩桩台三维有限元模型，计算出了多种荷载组合下桩台的应力场、位移场，绘制了各桩的轴力图 and 弯矩图，并将计算结果与以丰

海高桩墩台计算程序为代表的嵌固点法的计算结果进行了比较, 提出如下结论:

1) 有限元方法采用面面接触模型模拟桩土相互作用, 得出桩轴力最大点约在砂质黏性土和强风化含砾砂岩分界处; 而传统方法的嵌固点假设没有考虑土体对桩摩阻力随高程变化状况, 计算结果最大轴力出现在桩底, 与实际不符。在码头设计中, 建议对有限元方法算出的轴力最大点处加强配筋。

2) 对于有限元计算结果, 同排桩中边缘桩比非边缘桩轴力稍大, 而对于传统的嵌固点法, 同排桩轴力完全相同。在实际码头中, 结构空间协同受力, 边缘桩所受约束较小, 产生的应变会更大, 因而内力也会更大。因此, 建议在码头设计中对边缘桩加强配筋。

3) 对于大多数荷载组合, 有限元结果岸侧桩比板桩轴力稍大。板桩为密排桩, 刚度较大; 岸侧桩较为稀疏, 刚度较小, 变形稍大, 轴力也稍大一些。因此, 建议在码头设计中对稀疏桩排加强配筋。

4) 有限元计算结果表明, 桩底弯矩为零, 负弯矩极值出现在桩顶, 正弯矩极值大约出现在淤泥和中粗砂分界处, 与实际情况相符。而嵌固点法因为没有考虑桩基土对桩的摩阻力和侧压力随桩长的变化状况, 算得的弯矩图是一条直线, 弯矩极值出现在桩顶和桩底, 这与实际情况不符。

建议在码头设计中, 不要忽视桩中部正弯矩极值处正截面受弯承载力验算。

5) 由于有限元方法采用三维模型进行空间协同受力分析, 建立了较为真实的桩土作用模型, 对于大多数荷载组合, 有限元算得桩轴力比嵌固点法结果小, 这在一定程度上可以节省配筋, 从而节省工程造价。

总之, 有限元方法的优点不仅仅在于可以建立三维模型进行空间协同受力分析, 较为真实地模拟桩土相互作用, 求出不同土层对桩的摩阻力和侧压力沿桩长的分布状况, 还可以求出桩台的应力场和位移场, 便于关键部位的应力和变形精细分析, 这是传统的高桩墩台计算方法无法比拟的。但由于有限元方法建模工作量大, 计算耗时长, 精度受网格密度、单元形式等较多条件的影响, 如何发挥其优势, 将其更方便的应用于码头结构设计中还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 孙文俊, 胡维俊, 蔡新. 码头空间计算及桩基影响分析[J]. 河海大学学报, 1993, 21(1): 15-23.
- [2] 周旭, 刘海笑, 周锡初. 高桩墩式桩台的三维有限元分析[J]. 港工技术, 2000(1): 28-33.
- [3] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 小虎码头墩台计算书[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2010.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消息 ·

西江长洲枢纽上半年货物过闸量大增

2011 年以来, 随着内河水运发展上升为国家战略, 西江航运迎来了快速发展的战略机遇期, 西江航运干线运输发展形势良好。上半年长洲枢纽船闸完成过闸船舶载重吨为 3 667.20 万 t, 实载货运量 2 387.48 万 t, 较去年同期分别增加 23.11% 和 43.87%。

长洲枢纽船闸船舶、货物过闸量显著增加的原因主要有以下 3 个方面: 1) 西江航运干线贵港以下航道已提升为 Ⅰ 级航道, 改善了航道通航条件, 促进了运输船舶大型化, 提高了长洲枢纽船闸通过能力; 2) 西江沿江经济带初步形成, 水运货源较充足; 3) 今年上半年西江通航水位较去年同期好, 下行船舶基本可满载运营。

(来源: 《中国交通报》)