



多角度船舶撞击力作用下 柔性桩簇的受力分析

赵兰芳

(中铁建港航局集团勘察设计院有限公司, 广东 广州 511442)

摘要: 客运码头、老旧码头改造等工程项目广泛利用柔性靠船桩簇来解决其靠船问题, 而规范规定将船舶撞击力沿法向作用于柔性靠船桩簇的计算方式却不能满足该结构桩身的最大位移要求。探讨在多角度船舶撞击力作用下柔性桩簇结构中桩身的内力与变形性状, 建议在设计过程中, 在 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的船舶撞击角度范围内计算结构中桩的最大位移及内力以满足该结构的使用要求, 为该结构的设计计算、安全使用及可靠性评估提供参考。

关键词: 柔性桩簇; 船舶撞击角度; 桩身内力; 桩身变形

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0056-05

Force analysis of berthing pile cluster under action of ship impact from multiple angles

ZHAO Lan-fang

(CRCC Harbour & Channel Engineering Bureau Group Survey & Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 511442, China)

Abstract: The flexible pile clusters are widely used in the renovation engineering of the passenger wharf and old wharves to solve the problem of ship berthing, but the stipulations in the code concerning the ship impact can't satisfy the requirement of the pile's maximum displacement. This paper discusses the pile internal force and deformation of the berthing pile cluster structure under the action of ship impact forces from multiple angles, and suggests to calculate the maximal displacement of piles and internal force within the ship impact force angle within the scope of $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ during the design process to meet the operation requirements of the structure and to provide some valuable reference for the structural design and calculation, safe use and reliability evaluation for the berthing pile cluster structure.

Keywords: flexible berthing pile cluster; ship impact angle; pile internal force; pile deformation

柔性钢桩簇结构通过自身的变位及橡胶护舷的变形吸收船舶撞击的能量^[1-2]。在对该结构承受船舶撞击力的设计计算中, JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[3]规定, 船舶靠岸时的有效撞击能量是取法向速度(即船舶撞击角度为 90°)作为校核准则, 但实际上船舶的靠泊方向与码头前沿线呈一定的夹角(一般在 $15^{\circ} \sim 165^{\circ}$ 范围)^[4-5], 而并非完全按照法向方向来靠岸。故按照船舶撞击力沿法向的计算方法对于该结构的桩身性状而言是否为最不利情况, 值得探讨。

本文以珠江某客运码头工程项目为依托,

探讨在多角度船舶撞击力作用下柔性桩簇结构中桩身的内力和变形性状, 得出针对于该结构的最不利船舶撞击角度范围。建议在设计过程中, 应取该范围内的船舶撞击角度作为最不利荷载工况考虑, 为柔性钢桩簇结构的设计计算、安全使用及可靠性评估提供参考。

1 工程概况

码头工程结构形式为“桩簇-承台-钢引桥”式, 沿珠江顺岸布置(图1)。码头前方有2组柔性桩簇作为靠泊设施, 靠泊主桩直径800 mm,

收稿日期: 2014-11-05

作者简介: 赵兰芳(1972—), 女, 工程师, 从事水运工程设计。

其后布置 2 根 $\phi 700 \delta 22$ 的钢管桩。在平面上按等边三角形布置，桩间距 3 m。其后紧邻一个宽 9 m、高 1.5 m 的 C30 钢筋混凝土承台，承台下方为 3 根 $\phi 600 \delta 16$ 的钢管桩，后方用固定钢引桥与陆域相连。承台与前方桩簇间有一个 20 mm 的变形缝，从而限制了后排辅桩的最大

桩顶变形。为了增加结构的整体刚度，在桩间加设一系列 $\phi 254 \delta 16$ 的钢管横撑。在靠泊主桩上安装 A250 H \times 2 000 L 橡胶护舷。该客运码头主要用于停靠 330 客位的船舶，其主要尺度为 45 m \times 8.2 m \times 1.4 m（船长 L \times 船宽 B \times 满载吃水 T ）。

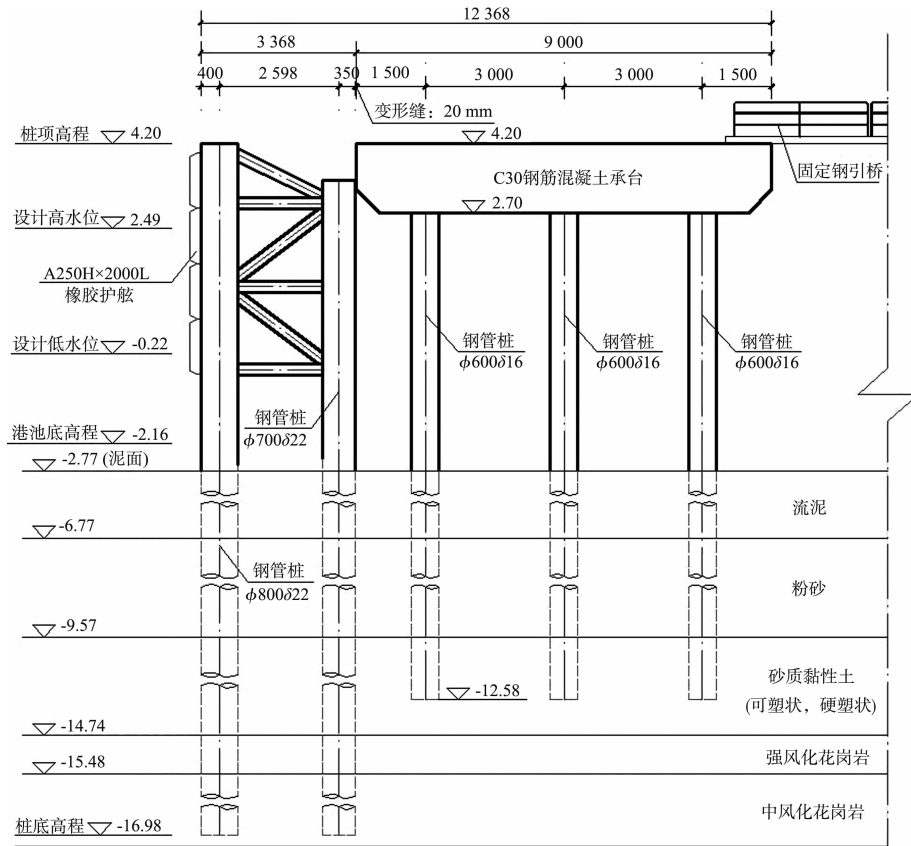


图 1 码头断面 (高程: m; 尺寸: mm)

2 有限元模型的建立

2.1 结构三维模型构件定义及桩-土边界条件

根据柔性桩簇的结构形式及力学特点，可将其受力分析简化为三维空间刚架进行有限元分析计算。应用结构通用有限元分析软件 SAP2000 建

立码头结构三维模型辅助计算。在建模过程中，将主桩、辅桩及横撑全部定义为空间等截面弹性梁单元，通过输入各个构件的材料及截面参数使其与结构原型尺度一致。

码头工程所在地各土层的物理力学指标见表 1。

表 1 各土层的物理力学指标参数

土层名称	高程范围/m	状态	地基容许承载力/kPa	密度/($t \cdot m^{-3}$)	粘聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)	$m/(kN \cdot m^{-4})$
流泥	-2.77 ~ -6.77	流塑	< 30	1.5	4.00	2.00	2 500
粉砂	-6.77 ~ -9.57	松散	60			25.00	4 500
砂质黏性土	-9.57 ~ -14.74	硬塑为主 局部可塑	250	1.9	24.22	17.52	10 000
花岗岩 1	-14.74 ~ -15.48	强风化	350	2.0	25.00	25.00	15 000
花岗岩 2	-15.48 以下	中风化	700				20 000

从表 1 可以看出, 该工程所在位置处基岩顶层至泥面间存在约 13 m 的覆盖层, 为一个“厚覆盖层-基岩”地基。该覆盖层对桩身的土抗力不可忽略。因此, 在定义桩-土相互作用的边界条件时, 采用限制桩底自由度与桩身弹簧相结合的方法。按照 JTJ 285—2000 《港口工程嵌岩桩设计与施工规程》^[6] 的规定将桩底边界条件定义为只允许桩底平动, 而不可转动; 同时, 根据文献[7], 采用竖向弹性地基梁法中的 m 法在桩身施加一定刚度的弹簧, 共同来模拟桩土相互作用的边界条件。其计算见图 2。

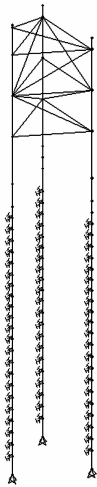


图 2 钢桩簇三维有限元模型及桩-土相互作用边界条件

2.2 不同角度船舶撞击力作用方式

根据 JTS 144-1—2010 《港口工程荷载规范》^[3] 相关规定, 取船舶的靠泊速度设计值为 0.3 m/s, 结合本文所选取橡胶护舷的吸能、反力曲线, 可得到船舶法向撞击力 $F = 280$ kN。从理论上分析可知, 当水平荷载作用位置距离桩底越大时, 对桩顶的变形越不利。因此本文只考虑在设计高水位时船舶撞击力作用于钢桩簇上。在有限元模型中, 通过在各个节点上施加集中力的形式来模拟船舶撞击力。不同的船舶撞击角度如图 3 所示, 取 $\Delta = 15^\circ$ 作为增量。由于存在对称性, 同时结合文献[4-5]中的说明, 在计算过程中, 只需要取 $15^\circ \sim 90^\circ$ 范围内的计算结果即可。

3 计算结果分析

由于钢桩簇与后方承台之间预留有 20 mm 的

变形缝, 因此要求该结构后排辅桩的最大变位值不得超过 20 mm。根据理论分析可知, 当船舶撞击角度在 $15^\circ \sim 90^\circ$ 范围内时, 辅桩 2 (图 3) 的桩身位移值应达到最大。因此, 在结果分析中重点探讨辅桩 2 在船舶撞击力作用下的桩身位移及内力值变化情况。

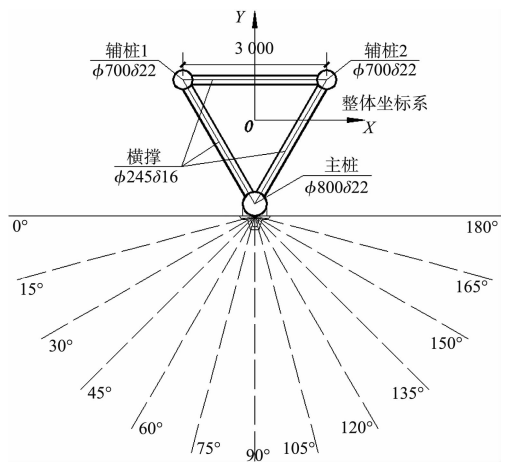


图 3 不同角度船舶撞击力示意

3.1 桩身位移分析

根据文献[3]规定, 船舶撞击力按法向方向作用在该结构上时, 辅桩 2 的 X、Y 及合位移方向的桩身位移如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 该桩主要产生 Y 方向的位移, 在正常使用情况下, 桩顶最大位移值满足规定的要求。同时, 笔者分别计算了船舶撞击角度在 $15^\circ \sim 90^\circ$ 范围内, 辅桩 2 在 3 个方向的桩身位移 (图 5)。

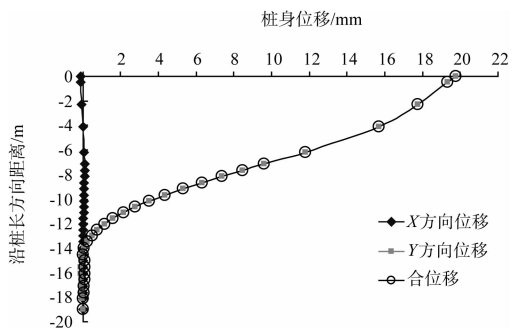


图 4 辅桩 2 在船舶撞击角为 90° 时桩身位移

从图 5 中可以看出, 随着船舶撞击角度的增加, X 方向的最大位移值在不断减小, 且桩顶最大位移值满足要求, 这与理论分析得到的结果相一致。但该桩在 Y 方向及合位移方向的最大位移值变

化规律与 X 方向不一致，并且 Y 方向及合位移方向的桩顶最大位移值均已超过了 20 mm。但在 90° 时，桩顶最大位移值却满足要求，说明桩顶最大位移随船舶撞击角度的变化存在着先增后减的变化规律。为了更为可靠地分析得出桩顶最大位移值与船舶撞击角度之间的函数关系，笔者重新调整船舶撞击角度增量为 $\Delta = 5^\circ$ 时，计算辅桩 2 在各撞击角度下 Y 方向及合位移方向的最大桩顶位移值（图 6）。

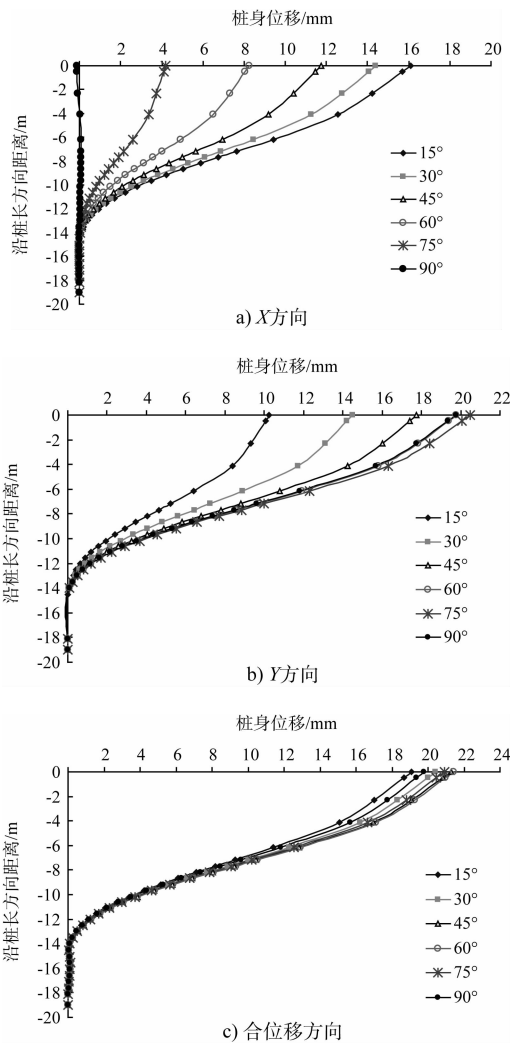
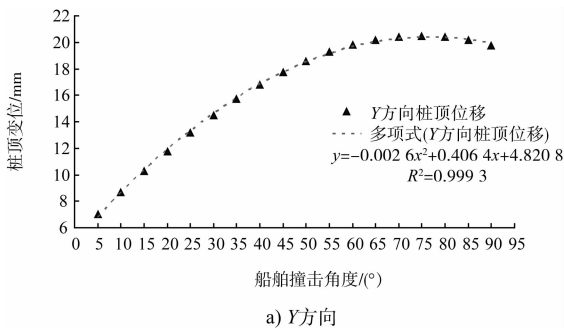
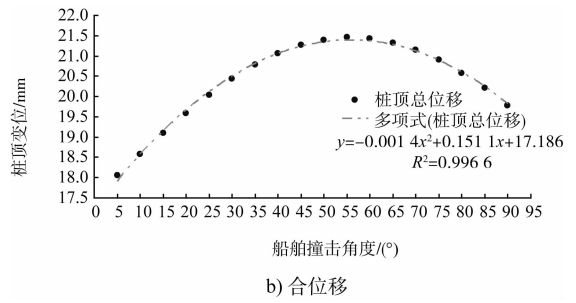


图 5 辅桩 2 的桩身位移



a) Y 方向



b) 合位移

图 6 辅桩 2 的桩顶最大位移

采用最小二乘法对该散点进行 2 次曲线拟合，得到 Y 方向及合位移方向上桩顶最大位移与船舶撞击角度之间的函数关系。从图中可以明显地看出，当船舶撞击角度为 90° 时，辅桩 2 在 Y 方向以及合位移方向上的桩顶位移均不是最大值。经拟合函数可计算得到，Y 方向的桩顶最大位移约 20.7 mm，对应的船舶撞击角度为 78.15°；而合位移方向上的桩顶最大位移约 21.86 mm，对应的船舶撞击角度为 53.96°，均已大于 20 mm。但在实际情况中，由于合位移方向上变形缝预留宽度应大于 20 mm，因此，若要充分保证辅桩 2 在 Y 方向的桩顶最大位移值符合规定，经计算得船舶撞击角度须小于 61.73°。

3.2 桩身内力分析

根据结构有限元分析计算结果，分别绘制得出在不同船舶撞击角度作用下辅桩 2 的桩身剪力与弯矩图（图 7 ~ 10）。

从图 7 ~ 8 可以看出，X 方向的桩身剪力 (V_2) 和弯矩 (M_3) 随着船舶撞击角度的增大而不断减小，建议在结构正常使用期，应校核低船舶撞击角度时的桩身内力。而从图 9 ~ 10 中可知，Y 方向的桩身剪力 (V_3) 和弯矩 (M_2) 并非在船舶撞击

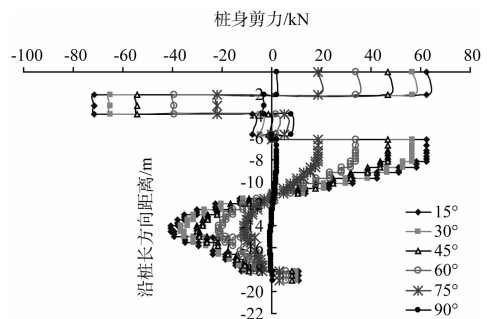


图 7 桩身 2 轴方向剪力 (V_2)

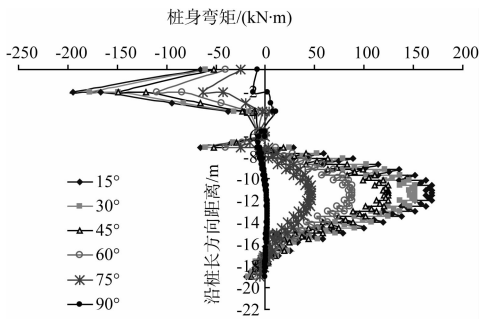


图8 桩身3轴方向弯矩 (M_3)

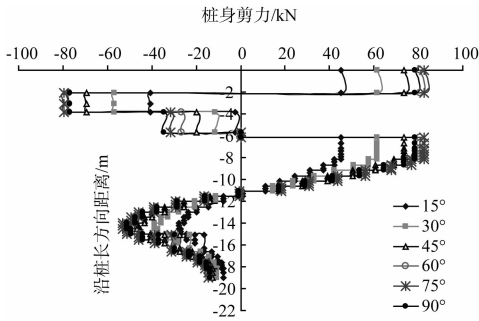


图9 桩身3轴方向剪力 (V_3)

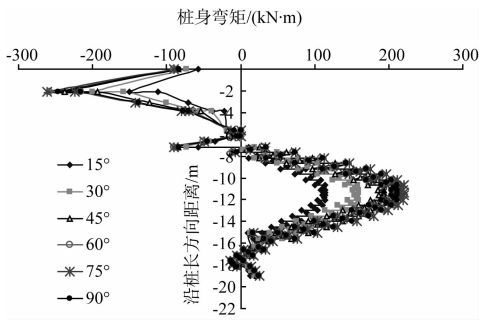


图10 桩身2轴方向弯矩 (M_2)

角度为 90° 时最大。同理，取船舶撞击角度增量 $\Delta = 5^\circ$ ，计算得到辅桩2在各撞击角度下的桩身剪力、弯矩的最大值（包括最大正值和最小负值的绝对值）（图11~12）。

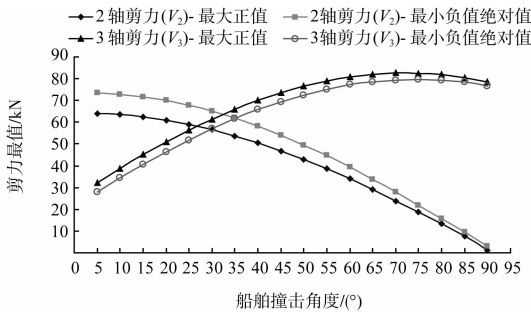


图11 辅桩2的桩身剪力最大值

从图11~12中可以看出，最不利的桩身内力出现在3轴方向的剪力最大正值 ($V_{3\max}$) 及2轴

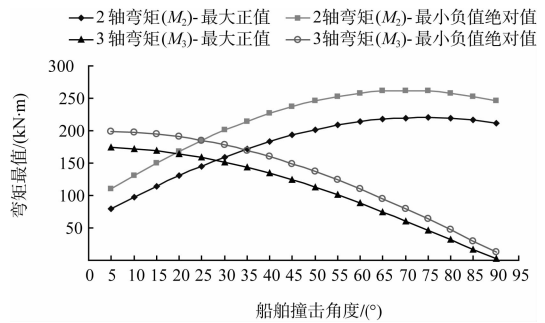


图12 辅桩2的桩身弯矩最大值

方向弯矩最小负值的绝对值 ($|M_{2\min}|$)，同样采用最小二乘法对这2条曲线进行2次拟合，可求得 $V_{3\max}$ 以及 $|M_{2\min}|$ 所对应的最不利船舶撞击角度分别为 78.87° 和 70.78° 。

4 结论

- 1) 船舶撞击角度分别为 78.15° 和 53.96° 时，辅桩2在Y方向及合位移上的最不利桩顶位移分别为 20.7 mm 及 21.86 mm ，若要满足该码头桩顶最大变位安全使用要求，则船舶撞击角度应小于 61.73° ；
- 2) 当船舶撞击角度为 78.87° 和 70.78° 时，分别对应桩身的最不利剪力和弯矩值。

综上所述，将船舶撞击力沿法向作用于柔性桩的计算方式不能满足该结构桩身最大位移要求。建议在设计过程中，在 $70^\circ \sim 80^\circ$ 的船舶撞击角度范围内计算结构中桩的最大位移及内力，以满足结构的使用要求，为钢桩簇柔性结构的设计计算、安全使用及可靠性评估提供参考。

参考文献:

- [1] 谢耀峰. 港口柔性桩工作形状计算的双参数法[J]. 海洋工程, 2005, 20(2): 38-42.
- [2] 刘速. 钢簇桩设计中桩与护舷能量分配比例的计算[J]. 水运工程, 2008(4): 23-25.
- [3] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].
- [4] 宗绍利. 船舶撞击力及系泊船舶波浪作用下的撞击力研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
- [5] 邱拓荒, 张颖, 孙克俐. 船舶撞击高桩码头的系统动力仿真研究[J]. 港工技术, 2013, 50(1): 37-39.
- [6] JTJ 285—2000 港口工程嵌岩桩设计与施工规程[S].
- [7] 吴林键, 舒丹, 王明祥, 等. 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[J]. 水运工程, 2013(4): 159-165. (本文编辑 郭雪珍)