

高桩梁板式码头空间结构计算中 忽略面板作用的方法

杨锡鏊, 陈振民

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 针对最新颁布的《高桩码头设计与施工规范》中的建议——高桩梁板式码头按空间结构计算时, 宜忽略面板的作用来计算纵梁和横梁的内力, 选取湛江某高桩码头工程的一个结构段为工程实例, 采用有限元分析软件ANSYS建立多种空间结构计算模型, 研究两种忽略面板作用的建模方法, 并通过对比各模型的计算结果, 分析高桩梁板式码头空间结构计算中面板刚度发挥的作用。对比结果表明: 把面板的弹性模量设成一极小值是高桩梁板式码头空间结构计算中忽略面板作用较为简便且可行的方法, 为高桩码头设计者提供了参考。

关键词: 高桩梁板式码头; 空间结构计算; 忽略; 面板; 有限元

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)09-0093-07

Ignoring slab effect method in spatial structure calculation for beam-slab wharf on high piles

YANG Xi-liu, CHEN Zhen-min

(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: In view of the suggestions from the newly issued *Design and Construction Code for Open Type Wharf on Piles* that slab effect should be ignored for calculating internal force of longitudinal beams and cross beams in spatial structure calculation for beam-slab wharf on high piles, we take a structural section of a high-pile wharf project in Zhanjiang as an engineering example, and establish several spatial structure calculation models by ANSYS to study two modeling methods of ignoring slab effect and analyze the slab stiffness effect in spatial structure calculation for beam-slab wharf on high piles by comparing the calculation results of various models. The comparison results show that setting the elastic modulus of slab to the minimum value is a convenient and feasible method of ignoring slab effect in spatial structure calculation for beam-slab wharf on high piles, which provide a reference for high-pile wharf designers.

Key words: beam-slab wharf on high piles; spatial structure calculation; ignore; slab; finite element

高桩码头是码头的三大结构形式之一, 其中高桩梁板式码头具有各构件受力明确合理、装配程度高、施工速度快等优点, 适用于荷载较大且复杂的大型海港码头, 在我国应用相当广泛^[1]。长期以来, 高桩梁板式码头的结构内力计算常把码头结构简化为纵向和横向2个平面进行分析, 纵梁及横向排架内力按平面结构计算。但随着港口向

深水化发展, 高桩码头的跨度和梁板尺寸越来越大, 桩基往往沿横梁和纵梁双向布置, 码头的空间整体特征越来越显著。因此, 在分析高桩码头各结构构件的内力时, 应取码头的—个结构段进行空间结构计算, 才能充分考虑各构件在空间上的相互影响和整体效应, 从而更真实地模拟码头结构的受力状态。

收稿日期: 2012-03-16

作者简介: 杨锡鏊(1982—), 男, 博士, 工程师, 主要从事港口结构工程和岩土工程计算。

随着计算机技术的高速发展和普及,采用大型通用有限元分析软件对高桩码头进行空间结构计算已越来越方便。我国交通运输部最新颁布的JTS 167-1—2010《高桩码头设计与施工规范》(简称“新规范”)中,已对高桩梁板式码头在什么情况下宜按空间结构计算,以及按什么方法建立空间结构计算模型都新增了明确且具体的建议。近年来,虽然已有很多学者对高桩码头的空间结构计算进行了研究和应用^[2-4],但针对“新规范”中的建议进行研究和分析讨论的报道仍比较少见。

基于此,选取湛江某高桩码头工程的一个结构段为工程实例,按照“新规范”中关于建立高桩梁板式码头空间结构计算模型的建议,采用有限元分析软件ANSYS建立空间有限元模型,着重研究了两种忽略面板作用的建模方法。并通过将几种空间有限元模型的结果进行对比,讨论了面板刚度发挥的作用,提出了较为简便的忽略面板作用建模方法,希望能为高桩梁板式码头的设计计算提供有价值的参考。

1 “新规范”关于梁板式码头空间结构计算的建议

“新规范”在第4章梁板式码头设计中规定:桩基沿横梁和纵梁双向布置、空间特征显著的码头,结构内力宜按空间结构计算。另外,“新规范”还建议高桩梁板式码头按空间结构计算时,可按下列方法建立计算模型^[5]:

1) 以计算桩的内力为目的时,面板可按薄壳单元考虑,纵梁、横梁及桩均可按梁单元考虑;

2) 以计算纵梁和横梁的内力为目的时,宜忽略面板的作用,按空间杆系结构计算,有经验时也可考虑面板的作用;

3) 桩端约束条件可参照平面排架计算要求确定;

4) 面板中性面、纵梁和横梁中性轴宜按实际高程考虑。

从上述建议中不难发现,建议1)主要针对建模时各构件所采用的单元类型;建议3)主要针对模型的边界条件;建议2)和4)主要针对建模过

程中应注意的问题,其中针对建议4)可通过偏移梁截面的位置来处理,该方法比较成熟且在有限元软件ANSYS中实现并不困难。而建议2)中关于是否忽略面板作用的建议还比较含糊,建模过程中如何实现忽略面板的作用,以及面板作用对高桩梁板式码头的空间结构计算有何影响,这些都有必要开展深入研究并加以论证。因此,下面介绍在ANSYS中两种忽略面板作用的建模方法,并结合工程实例对面板作用的影响进行探讨。

2 2种忽略面板作用的建模方法

在计算纵梁和横梁的内力时,实际上应考虑荷载包括:纵梁和横梁的自重,直接作用在纵梁和横梁上的荷载,以及面板的支座力。其中,面板的支座力是指作用在面板上的荷载在纵梁和横梁处产生的支座反力。因此,针对上述建议2),建立高桩梁板式码头空间有限元模型计算纵梁和横梁的内力时,忽略面板作用后的模型应要满足以下两点:

1) 施加在纵横梁上的荷载要包括由面板荷载产生的面板支座力;

2) 计算过程中忽略面板刚度对纵横梁受力状态的影响。

针对这两点要求,本文采用有限元分析软件ANSYS尝试了两种忽略面板作用的建模方法。

2.1 先提取面板支座反力再去掉面板单元计算

由前文所述可知,忽略面板作用比较标准的做法应该是:先求得由面板荷载在纵横梁处产生的支座反力,并将其连同其它荷载施加到纵横梁上,然后在没有面板单元的情况下按空间杆系结构计算。

但面板有单向板和双向板之分,荷载类型又可分为集中荷载、局部均布荷载和满布均布荷载,不同类型的板在不同荷载和支承条件下的面板支座力计算比较复杂,靠人工手算比较费时和麻烦,而利用ANSYS提取约束节点反力的方法可以比较方便地求得反力。因此,本文尝试忽略面板作用的第一种建模方法具体步骤如下:

1) 采用Shell63薄壳单元单独建立码头面板,并对位于纵梁和横梁位置处的面板节点施加位移

和转角约束(图1)。

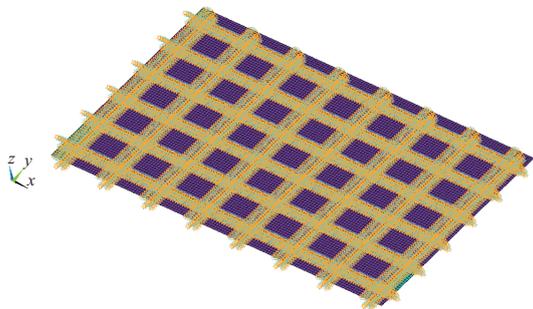


图1 单独面板模型

2) 对上述模型施加仅作用于面板的荷载, 如面板自重、堆货荷载和流动机械荷载等。

3) 求解并通过ANSYS的后处理器提取约束节点的节点反力。

4) 采用beam188梁单元建立纵梁、横梁和桩的空间杆系结构模型。其中桩的模型是根据《港口工程桩基规范》^[6]采用假想嵌固点法, 计算弹性长桩的受弯嵌固点距离泥面的长度, 再根据换算的嵌固点坐标与桩顶坐标建立的。纵横梁节点的高程是一样的, 但通过ANSYS的SECOFFSET命令, 把纵横梁的横截面往下偏移形心到横截面顶部的距离, 可以满足“新规范”对纵横梁中性轴宜按实际高程考虑的建议。最后, 划分网格时注意纵横梁的网格密度与上述单独面板模型的网格密度一致, 得到没有面板单元的码头空间杆系结构模型, 打开梁单元的单元形状后如图2所示。

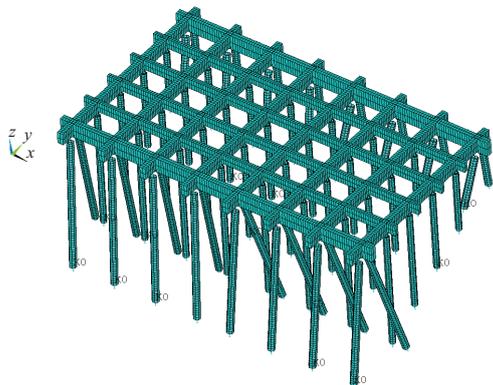


图2 空间杆系结构模型

5) 桩和梁之间的连接采用固接, 通过耦合桩顶节点和距离桩顶最近的梁节点的自由度来实现。在桩的嵌固点处沿桩轴线方向建立桩底端承弹簧, 其弹簧系数根据《高桩码头设计与施工规

范》^[5]的公式计算, 以满足桩的轴向刚性系数。

6) 对上述空间杆系结构模型施加作用于纵横梁上的荷载, 如纵横梁自重、门机轨道梁上的轮压力、系缆力等。把步骤3)提取的由面板荷载在纵横梁处产生的支座反力反向施加到相同位置的纵横梁节点上。

7) 求解并查看纵横梁内力结果。

2.2 把面板的弹性模量设成一极小值

上述忽略面板作用的建模方法虽然比较标准和合理, 但需要建立两次模型, 并要从第一个模型中提取节点反力再添加到第二个模型上。这一过程比较麻烦甚至需要编写程序把节点反力结果整理成纵横梁节点的荷载输入命令流, 花费设计人员大量的精力和时间。因此, 可以尝试直接建立包括面板的码头空间有限元模型, 但把面板的弹性模量设成一极小值, 这样既能把面板的荷载传递到纵横梁上, 又能在计算时忽略面板刚度的影响, 该建模方法的具体步骤如下:

1) 采用Shell63薄壳单元建立面板, 采用beam188梁单元建立纵梁、横梁和桩。

2) 把面板单元材料属性中的弹性模量设成一极小值。这里的极小值取值并不是越小越好, 太小的弹性模量会导致面板单元变形过大而无法完成计算, 应保证可以进行计算的前提下, 取得足够小以达到忽略面板刚度的目的即可。在实际工程中, 面板一般采用的混凝土弹性模量的数量级为 10^{10} Pa, 因此笔者建议面板单元的弹性模量极小值在50~100 Pa范围内取值均可。

3) 纵横梁横截面的偏移和桩端约束条件与第一种建模方法的步骤4)和5)相同。打开单元形状后的空间有限元模型如图3所示。

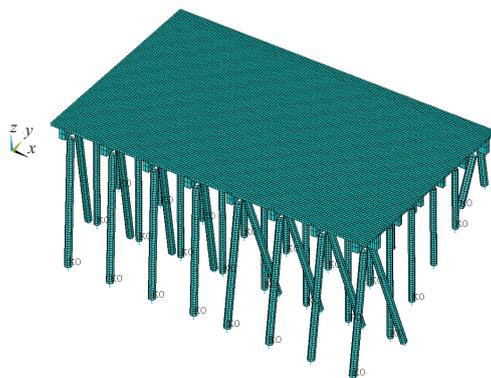


图3 空间梁板偏移模型

4) 施加计算工况所包含的荷载。

5) 求解并查看纵横梁内力结果。

3 各种空间有限元模型的计算结果对比和分析

为了验证上述忽略面板作用建模方法的可行性, 选取湛江某高桩码头工程的一个结构段为工程实例, 分别建立以下3种模型进行计算和分析:

- 1) 有面板+正常弹模, 考虑面板作用;
- 2) 无面板+传递面板支座力, 忽略面板作用;
- 3) 有面板+低弹模, 忽略面板作用。

每种模型分别计算2种工况, 通过对比考虑面板和忽略面板作用的模型结果, 分析面板刚度在哪些方面发挥了作用以及对计算结果产生的影响。

3.1 工程概况和各模型计算结果

该高桩码头的的一个结构段有8个排架, 排架

的间距为9 m, 纵梁的间距为7 m, 面板的厚度为0.55 m, 叉桩采用钢管桩, 直桩采用PHC桩, 码头的结构断面见图4, 各结构构件的材料参数见表1。

表1 各结构构件的材料参数

| 构件名称 | 密度/(kg·m ⁻³) | 弹性模量/Pa | 泊松比 |
|------|--------------------------|--------------------------------------|-------|
| 叉桩 | 6 850 | 2.06 × 10 ¹¹ | 0.300 |
| PHC桩 | 1 500 | 3.45 × 10 ¹⁰ | 0.167 |
| 纵、横梁 | 2 500 | 3.45 × 10 ¹⁰ | 0.167 |
| 面板 | 2 500 | 正常值 3.45 × 10 ¹⁰ , 极小值 50 | 0.167 |

计算的荷载包括:

- 1) 各结构构件的自重。
- 2) 堆货荷载: 荷载大小为20 kPa, 位于两轨道梁之间, 且门机工作情况下轨道1.5 m范围内不

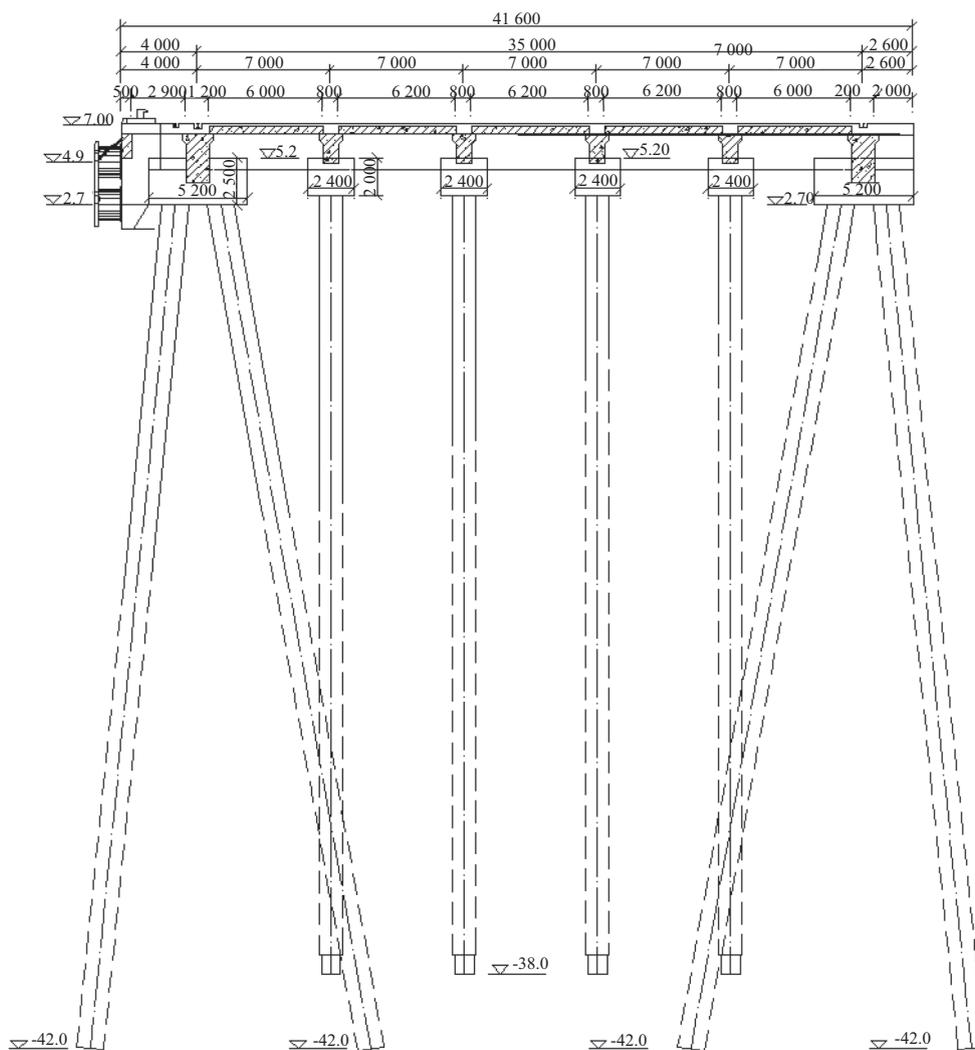


图4 码头结构断面

考虑堆载。

3) 卸船机荷载: 前轨道轮压1 060 kN/轮, 后轨道轮压1 200 kN/轮; 门机轮距1.2 m, 基距14 m。

4) 船舶系缆力2 000 kN, 系缆力方向与码头水平向成15°, 与码头前沿方向成30°, 同时作用于边跨第2和第4品排架上。

分别建立前文所述的3种模型, 并计算以下2

种工况:

1) 只有竖向荷载, 即包括自重、堆货荷载和卸船机荷载, 且卸船机荷载为主导作用荷载。各模型对该工况的计算结果见表2~4。

2) 包含水平荷载, 即包括自重、堆货荷载、卸船机荷载和系缆力, 且系缆力为主导作用荷载。各模型对该工况的计算结果见表5~7。

表2 工况1各模型计算的横梁内力值

| 模型 | 竖向弯矩/(kN·m) | | 水平弯矩/(kN·m) | | 竖向剪力/kN | | 水平剪力/kN | |
|---------------|-------------|-------|-------------|-----|---------|-------|---------|-----|
| | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 |
| 有面板 + 正常弹模 | -1 230 | 3 040 | -738 | 766 | -1 230 | 1 350 | -611 | 571 |
| 无面板 + 传递面板支座力 | -1 740 | 5 180 | -284 | 373 | -1 230 | 1 390 | -67 | 94 |
| 有面板 + 低弹模 | -1 810 | 5 170 | -286 | 377 | -1 260 | 1 390 | -67 | 95 |

表3 工况1各模型计算的纵梁(包括轨道梁)内力值

| 模型 | 竖向弯矩/(kN·m) | | 水平弯矩/(kN·m) | | 竖向剪力/kN | | 水平剪力/kN | |
|---------------|-------------|--------|-------------|-----|---------|-------|---------|-----|
| | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 |
| 有面板 + 正常弹模 | -7 600 | 5 820 | -594 | 565 | -5 760 | 6 270 | -325 | 291 |
| 无面板 + 传递面板支座力 | -12 100 | 9 930 | -226 | 257 | -7 590 | 8 630 | -52 | 36 |
| 有面板 + 低弹模 | -12 100 | 10 000 | -228 | 261 | -7 650 | 8 680 | -53 | 36 |

表4 工况1各模型计算的桩位移和桩内力值

| 模型 | 桩顶位移最大值/mm | | | 轴力/kN | | M_y 弯矩/(kN·m) | | M_z 弯矩/(kN·m) | |
|---------------|------------|-------|--------|--------|------|-----------------|-----|-----------------|-----|
| | X | Y | Z | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 |
| 有面板 + 正常弹模 | 1.90 | -1.95 | -12.14 | -8 460 | -747 | -570 | 488 | -457 | 465 |
| 无面板 + 传递面板支座力 | 2.16 | -2.82 | -12.93 | -8 760 | -842 | -708 | 554 | -523 | 513 |
| 有面板 + 低弹模 | 2.16 | -2.89 | -13.16 | -8 850 | -906 | -708 | 567 | -522 | 512 |

表5 工况2各模型计算的横梁内力值

| 模型 | 竖向弯矩/(kN·m) | | 水平弯矩/(kN·m) | | 竖向剪力/kN | | 水平剪力/kN | |
|---------------|-------------|-------|-------------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 |
| 有面板 + 正常弹模 | -1 370 | 1 810 | -521 | 466 | -1 080 | 1 130 | -579 | 582 |
| 无面板 + 传递面板支座力 | -2 050 | 3 410 | -7 730 | 3 970 | -1 280 | 1 200 | 0 | 2 580 |
| 有面板 + 低弹模 | -2 150 | 3 400 | -7 730 | 3 980 | -1 350 | 1 210 | 0 | 2 580 |

表6 工况2各模型计算的纵梁(包括轨道梁)内力值

| 模型 | 竖向弯矩/(kN·m) | | 水平弯矩/(kN·m) | | 竖向剪力/kN | | 水平剪力/kN | |
|---------------|-------------|-------|-------------|-------|---------|-------|---------|-----|
| | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 |
| 有面板 + 正常弹模 | -5 390 | 4 660 | -497 | 413 | -4 160 | 4 710 | -241 | 244 |
| 无面板 + 传递面板支座力 | -8 070 | 7 680 | -3 520 | 4 850 | -5 510 | 6 360 | -861 | 0 |
| 有面板 + 低弹模 | -8 140 | 7 730 | -3 520 | 4 850 | -5 570 | 6 410 | -862 | 0 |

表7 工况2各模型计算的桩位移和桩内力值

| 模型 | 桩顶位移最大值/mm | | | 轴力/kN | | M_y 弯矩/(kN·m) | | M_z 弯矩/(kN·m) | |
|---------------|------------|-------|--------|--------|-------|-----------------|-------|-----------------|-----|
| | X | Y | Z | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 | 最小 | 最大 |
| 有面板 + 正常弹模 | 9.08 | -8.10 | -9.55 | -6 390 | 1 570 | -1 790 | 2 130 | -851 | 861 |
| 无面板 + 传递面板支座力 | 24.71 | -5.61 | -10.23 | -6 540 | 631 | -1 110 | 1 410 | -947 | 971 |
| 有面板 + 低弹模 | 24.71 | -5.68 | -10.46 | -6 680 | 568 | -1 110 | 1 420 | -948 | 971 |

3.2 两种忽略面板作用模型的结果对比和分析

为了验证“先提取面板支座反力再去掉面板单元计算”这种忽略面板作用建模方法的可靠性,提取模型中某一块面板在其自重和满布堆货荷载作用下位于纵梁和横梁位置处的节点反力,并与采用常规方法计算的面板支座反力进行对比,对比结果见图5。其中,计算满布均布荷载作用下面板支座反力的常规方法是参考《港口水工建筑物》^[1]按图6所示将荷载分配到纵梁和横梁上的。

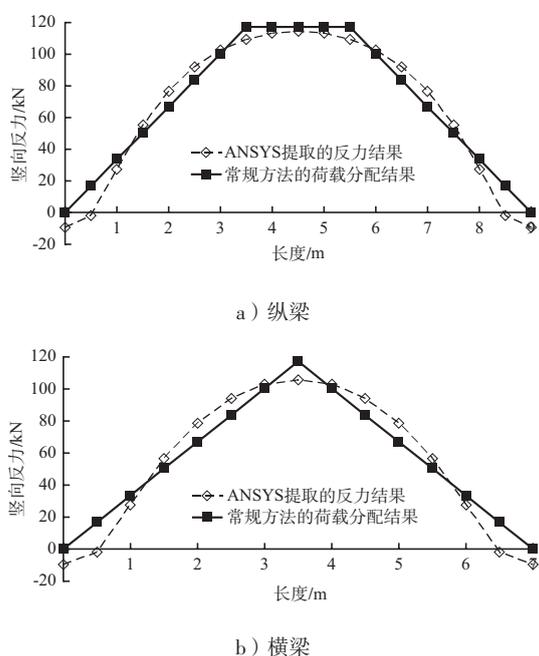


图5 节点反力与常规荷载分配结果对比

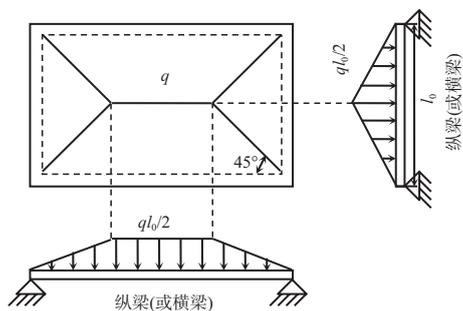


图6 双向板上均布荷载在纵、横梁上的分配^[1]

从图5可以看出,采用ANSYS提取由面板荷载在纵横梁位置处产生的节点反力,与常规方法按荷载分配计算纵横梁处的面板支座反力比较接近。因此,可以认为本文提出的“先提取面板支座反力再去掉面板单元计算”这种忽略面板作用

的建模方法是合理可靠的。

从表2~7可见:“无面板+传递面板支座力”与“有面板+低弹模”这2种忽略面板作用模型的各项计算结果均十分接近。由此可以证明,把面板的弹性模量设成一极小值,确实可以做到既把面板的荷载传递到纵横梁上,又能在计算时忽略面板刚度的影响,且计算结果同样合理可靠。由于直接把面板的弹性模量设成一极小值十分容易操作,也无需做额外的工作,因此该方法是高桩梁板式码头空间结构计算中忽略面板作用较为简便且可行的方法。

3.3 面板刚度所起作用的探讨

通过对工程实例的2种工况分别建立考虑面板作用和忽略面板作用的模型进行计算,从表2~7的结果对比来看,可以根据工况是否存在水平荷载做如下分析:

1) 只有竖向荷载作用时(工况1)。

对于纵横梁的竖向弯矩,忽略面板作用的计算结果约是考虑面板作用的1.4~1.7倍;对于纵横梁的竖向剪力,忽略面板作用的计算结果约是考虑面板作用的1~1.4倍。这主要是因为考虑面板作用时,与梁相连的面板其抗弯能力可使梁的竖向内力分配更均匀。

对于桩顶的竖向位移和桩的最大压桩力,忽略面板作用的计算结果约是考虑面板作用的1.04~1.08倍,相差很小。可见,在只有竖向荷载作用时,是否考虑面板作用对桩的上述两项计算结果影响并不大。

而在没有水平荷载作用时,分析纵横梁的水平内力、桩顶水平位移以及桩的水平弯矩意义并不大,因此放在有水平荷载作用的工况来分析。

2) 包含水平荷载作用时(工况2)。

对于纵横梁的水平弯矩,忽略面板作用的计算结果约是考虑面板作用的7~15倍;对于纵横梁的竖向剪力,忽略面板作用的计算结果约是考虑面板作用的3~4倍。这主要是因为面板在水平方向的尺寸较大,并能把相邻的纵横梁连成一个整体,既变相大大提高了梁的水平刚度,又可以把水平荷载向其他构件传递。

对于桩顶的水平位移, 在水平荷载较大的方向, 忽略面板作用的计算结果约是考虑面板作用的2.7倍; 对于桩的拔桩力, 忽略面板作用的计算结果约是考虑面板作用的0.4倍; 对于桩的水平弯矩, 在水平荷载较大的方向, 忽略面板作用的计算结果约是考虑面板作用的0.6倍。这主要是因为忽略了面板的作用后, 水平荷载全由纵横梁来承担, 而考虑面板的作用能使水平荷载传递到桩上, 主要由叉桩来承担。因此, 考虑面板作用模型计算的拔桩力和桩水平弯矩更为合理。

综上所述, 以计算纵梁和横梁的内力为目的时, 忽略面板作用计算得到的内力结果比考虑面板作用时偏大, 尤其在有水平荷载作用时, 求得的纵横梁水平内力要偏大许多, 但按照该结果进行纵横梁配筋对工程来说是偏安全的。

以计算桩的内力为目的时, 考虑面板的作用能使水平荷载传递到桩上, 使计算得到的桩内力结果更符合实际。因此, “新规范”建议以计算桩的内力为目的时, 面板可按薄壳单元考虑是合理正确的。

4 结论

1) 针对“新规范”关于“高桩梁板式码头按空间结构计算时, 宜忽略面板的作用来计算纵梁和横梁的内力。”这一建议, 通过工程实例对比计算, 证明了把面板的弹性模量设成一极小值是忽略面板作用较为简便且可行的方法。

2) 对工程实例的两种工况分别建立考虑面板作用和忽略面板作用的模型进行计算, 通过对比两者计算的各结构构件内力值发现: 以计算纵梁

和横梁的内力为目的时, 忽略面板作用计算得到的纵横梁内力结果偏大, 对工程设计偏安全; 以计算桩的内力为目的时, 考虑面板作用计算的结果更合理和符合实际。

3) 当有水平荷载作用时, 面板的水平刚度及其把纵横梁连成整体的作用, 对码头结构整体内力的分配影响很大, 完全忽略面板的作用进行计算并不十分合理。因此, 在有水平荷载作用时, 是否要忽略面板的作用, 或者以某种刚度折减的方式来减弱面板的作用, 有必要做深入的研究和讨论。

4) 在考虑面板作用的空间有限元模型中, 面板与纵横梁之间的连接普遍采用刚接。而在实际工程中, 面板与纵横梁之间常用外伸钢筋连接并用混凝土现浇在一起, 其连接的强度往往处于铰接与刚接之间, 包括桩顶与桩帽之间的连接也与之类似。如何更真实地模拟这种连接强度, 是今后值得进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] 陈万佳. 港口水工建筑物[M]. 北京: 人民交通出版社, 1989.
- [2] 董华钢. 高桩码头设计按空间与平面计算方法的比较[J]. 水运工程, 2001(9): 36-37.
- [3] 舒宁. 高桩梁板结构码头设计中空间有限元方法的研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [4] 王婷婷, 陈振民, 何文钦. 高桩梁板码头结构设计中的空间有限元分析[J]. 水运工程, 2009(7): 118-123.
- [5] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [6] JTJ 254—1998 港口工程桩基规范[S].

(本文编辑 郭雪珍)

专业论坛 技术伴侣