

桩基码头空间结构的内力计算与分析

武清玺¹, 张旭明¹, 李建国²

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京市港务局, 江苏 南京 210000)

摘要:根据桩基码头的结构特点, 采用空间刚架单元、板单元和桩基单元及其组合模拟码头结构空间受力状态, 用研制的空间结构内力分析计算程序, 对南京港某码头进行结构计算, 并将空间结构的计算结果与平面情况的计算结果进行比较. 分析结果表明: 用空间刚架单元、板单元和桩基单元模拟码头各构件, 对码头进行空间结构分析是适宜的; 空间结构的计算结果较平面结构计算结果能更好地反映桩基码头的空间效应和简化计算带来的误差.

关键词:桩基码头; 空间结构; 有限元法; 内力计算

中图分类号: TU311

文献标识码: B

文章编号: 1006-7647(2004)03-0021-03

桩基码头上部结构主要由梁、柱和面板等构件组成, 下部结构主要由直桩、叉桩和斜桩等组成. 桩基码头的受力特点是: 上部结构的竖向荷载通过梁、柱传至桩基, 水平荷载则主要由叉桩、斜桩承受.

在桩基码头设计中, 结构分析是根据实际承受的水平荷载和竖向荷载, 将空间结构简化为板、桩、平面排架和弹性支座连续梁进行计算. 理论分析和实验研究证明, 简化计算产生的误差, 一方面使平面结构设计比较保守, 另一方面也可能使整体结构的设计不尽合理, 而带来一些结构安全方面的缺陷.

本文根据南京港某码头在使用过程中出现的问题, 分别用平面结构和空间结构两种模型进行分析计算, 并将计算结果进行比较, 分析码头结构出现损坏的原因, 得出的计算结果对码头结构的设计和使用具有参考价值.

1 空间结构的内力计算

桩基码头是由空间刚架单元、板单元和桩基单元组成的空间结构. 本文在对各类单元进行力学分析的基础上, 构成整体计算的劲度矩阵、荷载列阵和结点位移列阵, 然后应用自编的电算程序进行计算.

码头结构整体计算的有限元平衡方程为

$$K\delta = F \quad (1)$$

式中: K 为结构整体劲度矩阵; δ 为整体结点位移列阵; F 为整体结点荷载列阵. 结构整体劲度矩阵由各类单元劲度矩阵组装而成.

1.1 空间刚架单元

空间刚架单元承受轴向力、剪力、扭矩和弯矩作用, 每一端有 6 个位移分量, 如图 1 所示. 在局部坐标系中, 单元的劲度矩阵及转换矩阵见文献[1].

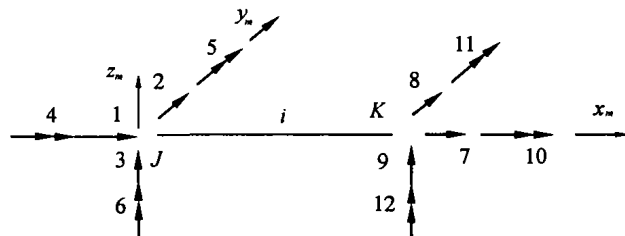


图1 空间刚架单元示意图

通过转换矩阵 L_T , 可将局部坐标下的单元劲度矩阵转换为整体坐标中的单元劲度矩阵, 即

$$k_i = L_{T_i}^T k_{m_i} L_{T_i} \quad (2)$$

由有限元整体平衡方程求出结点位移后, 即可由式(3)求得各杆件的杆端内力

$$F_{m_i} = k_{m_i} \{\delta_m\}_i + F_{L_i} \quad (3)$$

式中: F_{m_i} 为第 i 单元杆端内力列阵; $\{\delta_m\}_i$ 为第 i 单元杆端在局部坐标系下的结点位移; F_{L_i} 为第 i 单元固端力列阵.

1.2 板单元

考虑基于薄板理论的非协调矩形板单元^[2], 如图2所示, 单元的结点位移列阵为

$$\delta^e = [\delta_i^T \delta_j^T \delta_m^T \delta_p^T]^T = [w_i \theta_{xi} \theta_{yi} w_j \theta_{xj} \theta_{yj} w_m \theta_{xm} \theta_{ym} w_p \theta_{xp} \theta_{yp}]^T \quad (4)$$

式中: w_i 为第 i 点的挠度; θ_{xi} , θ_{yi} 分别为第 i 点绕 x

轴和 y 轴的转角。

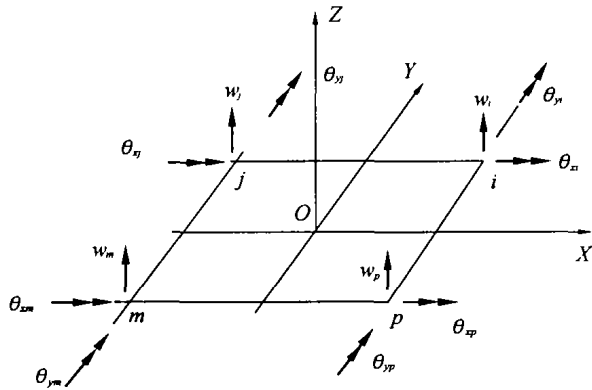


图2 矩形板单元示意图

板单元的劲度矩阵可由薄板弯曲问题的虚功方程导出：

$$k = \iint B^T D B dx dy \tag{5}$$

式中： D 为弹性矩阵； B 为几何矩阵。将 D, B 的表达式代入并积分，即可得板单元的劲度矩阵 $k_s^{[2]}$ 。

为了反映承受面内力的情况以及与空间刚架单元进行组合，本文考虑了薄膜应变与弯曲应变的组合。薄膜单元劲度矩阵记为 $k_s^{p[2]}$ ，对面内转动自由度采用合理转动刚度 k_D 以消除方程的奇异性，组合后的单元劲度矩阵为

$$k_{rs} = \begin{bmatrix} k_s^p & & \\ & k_s^b & \\ & & k_D \end{bmatrix} \tag{6}$$

1.3 桩基单元

现行规范推荐桩基土按线性计算^[3]，即假设土的反力与相应的位移成正比。桩基单元如图3所示， J 端在桩帽处，称为桩头，有竖向、水平向线位移和角位移共6个自由度； K 为桩尖，在深层泥土中。

根据不同的约束条件，桩基单元劲度矩阵可表示为^[4]

$$k_{pmi} = \begin{bmatrix} k_v & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 & 0 & 0 & -k_2 \\ 0 & 0 & k_1 & 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & 0 & k_4 & 0 \\ 0 & -k_3 & 0 & 0 & 0 & k_4 \end{bmatrix} \tag{7}$$

式中： k_1, k_3 分别为桩头只产生 y_m, z_m 方向的单位位移时，作用于 y_m, z_m 方向的力和力矩； k_2, k_4 分别为桩头只产生绕 y_m, z_m 方向的单位转角时，作用于 y_m, z_m 方向的力和力矩； k_v 为桩头产生轴向单位位移时作用于桩头的轴向力； k_p 为桩头产生单位扭转角时，作用于桩头的扭矩。桩基单元劲度矩阵中各元素的取值方法见文献[3]。

2 码头结构的内力计算与分析实例

南京港某码头结构的示意图如图4所示。将结构划分为206个空间刚架单元，27个板单元，28个桩基单元，结点总数为120，自由度总数为552。

计算工况为：①正常荷载作用：自重+输煤机械作用+靠船力300kN(作用在弹簧桩上)；②非正常荷载作用：自重+输煤机械作用+靠船力300kN(作用在码头排架上)。

工况①是指码头正常使用时，船先触及弹簧钢桩，然后船与钢桩一起靠向码头；工况②是指码头非正常使用情况，如由于风大、水流急等客观条件，使船未靠及钢桩而直接撞到码头上。

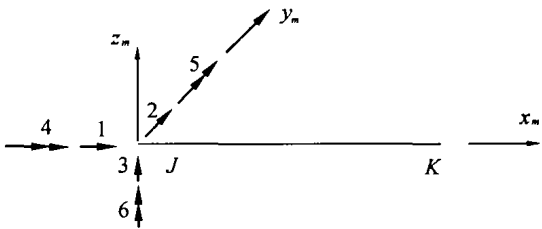


图3 桩基单元示意图

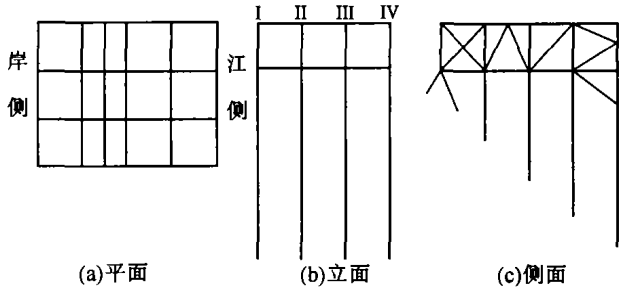


图4 码头结构示意图

2.1 主要构件的截面性质

该码头结构主要由横梁、纵梁、立柱和桩基等构件组成，各杆件横截面的特性列于表1。

表1 各杆件横截面的特性

杆件	型号	惯矩 I_{zm} /($10^{-3}m^4$)	惯矩 I_{ym} /($10^{-3}m^4$)	惯矩 I_{xm} /($10^{-3}m^4$)	剪切系数
横梁(B)	1	6.75	5.40	1.35	1.2
	2	2.50	1.60	0.90	1.2
纵梁(T)	1	10.15	1.58	8.58	1.2
	2	1.35	0.68	0.68	1.2
	3	3.29	2.28	1.01	1.2
	4	10.40	7.20	3.20	1.2
立柱(V)	1	10.15	1.58	8.58	1.2
	2	2.50	0.90	1.60	1.2
	3	6.75	1.35	5.40	1.2
	4	1.35	0.68	0.68	1.2
桩基(Z)	1	10.42	5.21	5.21	1.2
	2	6.83	3.42	3.42	1.2

2.2 计算结果及整理分析

根据上述杆件、薄板和桩基构件力学分析的基本理论，应用作者研制并经过验证的空间结构有限

元计算程序^[4],对该码头结构进行了计算,所得结果及分析意见如下:

a. 对于工况①,按空间结构进行计算,表2给出了排架Ⅱ(图4)内力较大杆件的计算结果.由表2可知,弹簧钢桩附近的梁、柱内力较大,但总体上各杆件内力分布是合理的,大部分构件的内力值不大.

表2 排架Ⅱ部分杆件的内力(空间,工况①)

杆件	轴力 /kN	剪力 Q_{ym} /kN	剪力 Q_{zm} /kN	扭矩 /($kN \cdot m$)	弯矩 M_{ym} /($kN \cdot m$)	弯矩 M_{zm} /($kN \cdot m$)
B21	152.2839	6.6901	4.9525	-0.8947	4.3946	18.4170
B23	102.0871	4.9290	3.8140	0.1096	-2.6749	4.5412
V24	33.3895	6.9570	0.3328	-0.5376	-1.0012	11.2771
V25	39.2066	3.3298	-1.2610	-0.6486	-1.9791	-6.6685
Z23	120.4502	0.5152	-0.0301	-0.2700	0.2370	3.0699
Z24	179.9165	1.1879	-0.0929	-0.2313	0.5488	5.4289

注:杆件编号V为立柱,B为横梁,Z为桩基(表3,表4同此).

b. 对于工况②,分别按平面结构和空间结构进行计算.由于是非正常靠船情况,本文选取高水位时,靠船力作用在第一层面板高程时计算.表3给出了按平面结构算得的部分构件的内力值,由计算结果可以看出,靠船撞击处附近杆件内力较大,特别是横梁的轴力较大,这对码头结构的安全运行不利.从现场察看的情况看,码头前沿构件混凝土破损较严重,横梁多处出现纵向裂缝,这主要是因为横梁的轴力较大所致,可见结构计算的结果与实际情况相符.

表3 排架Ⅱ部分杆件的内力(平面,工况②)

杆件	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/($kN \cdot m$)
B11	283.8564	2.2868	13.0088
B13	184.3442	0.5478	-0.5929
V14	46.5424	2.4352	8.3391
V15	45.9494	18.8847	-48.6914
Z13	130.4745	1.7125	-4.3572
Z14	186.5806	4.0828	-3.2564

c. 在相同荷载作用下,按空间结构计算,得到的部分结果列于表4.计算结果表明,靠船力作用的排架内力最大,其余排架内力则较小,而横梁承受的两个方向的弯矩大小接近,这说明该码头结构空间效应明显.码头前沿的横梁和立柱内力均较大,特别是轴力较大,这一结果与平面结构的结果一致,说明轴力是引起部分横梁、立柱出现纵向裂缝的主要因素.比较平面结构与空间结构的计算结果可见,平面情况算得的杆件内力普遍比空间情况大,所以按平面情况设计码头是偏于安全的.但该码头结构的空间效应明显,应根据空间结构的计算结果进行码头的整体设计,才能做到既经济又安全.

从桩的内力分布看,靠船力主要由叉桩承担,因此,叉桩的工作状况对码头安全运行的影响很大,这一结果与现场检测的结果是一致的.关于桩基的质量检测结果,可参考文献[5].

表4 排架Ⅱ部分杆件的内力(空间,工况②)

杆件	轴力 /kN	剪力 Q_{ym} /kN	剪力 Q_{zm} /kN	扭矩 /($kN \cdot m$)	弯矩 M_{ym} /($kN \cdot m$)	弯矩 M_{zm} /($kN \cdot m$)
B21	269.1590	-4.7351	2.8744	1.1465	11.0415	12.6183
B23	174.3317	-2.2718	10.4536	0.0465	-8.2821	4.2883
V24	37.9294	-1.0621	1.7329	0.4676	-3.3298	-3.5718
V25	42.7152	10.4602	-1.9341	1.0676	3.0274	14.1673
Z23	113.6026	0.2717	0.0754	0.6257	-0.4680	1.6763
Z24	184.0646	0.6989	0.2685	0.8616	-0.8829	3.3600

3 结 语

a. 用空间刚架单元、板单元和桩基单元模拟码头各构件,对码头进行空间结构分析是适宜的,选取的力学模型比较符合实际情况,得出的结果具有实用意义.

b. 与现行设计方法(按平面结构计算)相比,空间结构计算的结果有利于进一步认识桩基码头的空间效应,有利于研究非正常荷载作用下码头结构的整体响应.

c. 将空间结构的计算结果与平面结构的计算结果相比较,可以进一步认识简化计算带来的误差,为改进设计提供依据.

参考文献:

[1] 杨仲侯,胡维俊,吕泰仁.结构力学[M].北京:高等教育出版社,1992.294~298.
[2] 华东水利学院.弹性力学问题的有限单元法[M].北京:水利电力出版社,1978.151~157.
[3] JTJ254—98,港口工程桩基规范[S].
[4] 胡维俊,孙文俊,张旭明,等.非线性地基上桩结构物空间分析[J].水利学报,1994(1):38~47.
[5] 武清玺,江泉.码头结构的健康诊断及安全性评价[J].土木工程学报,2003,36(11):75~78.

(收稿日期:2003-05-07 编辑:张志琴)

