

水平力在窄桩台码头排架中分配研究

陈廷国*, 徐凤娇, 侯永为

(大连理工大学 建设工程学部 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对窄桩台高桩码头排架中水平集中力的横向分力分配系数建立新的简化模型, 给出模型求解方法. 确定水平集中力的横向分力在窄桩台码头各排架中的分配系数时, 排架简化为支撑弹簧, 码头上部结构在水平方向不能再被视为刚性连续梁, 而应该看作柔性连续梁. 提出了排架水平刚性系数和弹性连续梁的求解公式, 并编制成电子表格, 只需要输入码头尺寸和材料参数等, 即可直接得到分配系数. 对于窄桩台码头, 最不利排架可能不再是端部排架, 且规范计算得到的最不利分配系数偏小, 可能会存在安全隐患. 用电子表格计算分配系数可提高设计精度, 确保结构安全可靠. 研究结果可以为结构设计和规范修订提供参考.

关键词: 窄桩台; 水平刚性系数; 柔性连续梁; 分配系数; 电子表格

中图分类号: U 656.113 **文献标识码:** A **doi:** 10.7511/dllgxb201502010

0 引言

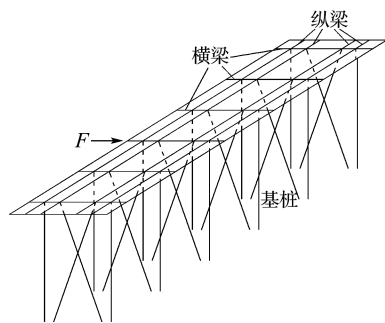
《高桩码头设计与施工规范》^[1] 规定, 确定水平集中力的横向分力在各排架中的分配时, 将码头上部结构在水平方向简化为一个刚性连续梁 ($EI = \infty$). 此种简化方法认为码头上部结构位移呈刚体位移特性, 这与窄桩台码头实际位移情况不符. 通过调研发现, 对于在建或已经投入使用的私人业主码头、小渔港码头、改扩建码头, 以及特殊用途码头 (比如缉私码头、航标站、救助基地工程) 等, 高桩码头的桩台宽度通常较小. 对于这样的码头, 计算水平力的横向分力在各排架中的分配时, 如果仍按照规范建议的方法进行, 会出现最不利分配系数偏小的问题, 从而引起安全隐患.

本文针对窄桩台码头, 修正规范中的计算简化模型, 依据五弯矩方程, 推导分配系数计算公式, 为水平力在窄桩台码头排架中的分配提供设计依据.

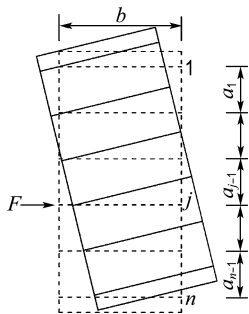
1 理论推导

高桩梁板式码头空间示意图如图 1(a) 所示, 横梁与基桩组成横向排架. 假设上部结构和基桩的弹性模量分别为 E_b 和 E_c , 码头面板和基桩的

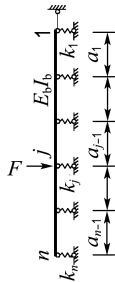
截面惯性矩分别为 I_b 和 I_c . 计算桩长 l , 基桩横截面积 A_c . 码头宽度 b , 面板厚度 h , 故 $I_b = hb^3/12$.



(a) 空间模型简化



(b) 平面位移



(c) 计算简图

图 1 高桩梁板式码头结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of high-piled slab-beam wharf

码头结构段共有 n 榀排架, 一榀排架有 p 根桩. 桩长 l 可由 m 法或假想嵌固点得到.

码头受到水平集中力作用后, 平面位移图如图 1(b) 所示. 将码头上部结构在水平方向视为一个柔性连续梁, 排架简化为支撑弹簧, 按照弹性支撑连续梁计算^[2], 计算简图如图 1(c) 所示.

1.1 水平刚性系数 k

排架的水平刚性系数即使此排架产生单位水平位移时需要施加的水平力. 考虑到码头的空间性和排架平面计算的非线性, 很难推导出排架水平刚性系数的精确计算公式, 本文给出一简化计算方法. 将排架简化为平面杆系结构, 考虑桩的轴向变形. 在水平集中力作用下, 用位移法求解结构内力, 未知量包括水平位移和各节点处的竖向位移与转角. 因为上部横梁抗弯刚度相较于桩的刚度高出 2~3 个数量级, 因此可以认为横梁刚度无穷大, 基本未知量的个数简化为 3 个: 横梁水平位移 Δ_1 、横梁竖向位移 Δ_2 和横梁转角 Δ_3 (横梁任意位置转角都为 Δ_3 , 在此取桩 p 顶部处横梁转角表示), 如图 2 所示. 如果水平集中力为单位力, 则排架的位移法方程为

$$\begin{aligned} k_{11}\Delta_1 + k_{12}\Delta_2 + k_{13}\Delta_3 &= 1 \\ k_{21}\Delta_1 + k_{22}\Delta_2 + k_{23}\Delta_3 &= 0 \\ k_{31}\Delta_1 + k_{32}\Delta_2 + k_{33}\Delta_3 &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

写成矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: k_{ij} 等于结构沿第 j 个自由度方向产生单位位移, 其他所有自由度位移等于 0 时, 引起的 i 支座约束反力.

由式 (2) 可得位移

$$\begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

排架的水平刚性系数

$$k = 1/\Delta_1 \quad (4)$$

1.2 分配系数

用力法求解图 1 所示简化结构. 为计算简便, 解除中间各支座截面的抗弯约束, 代以铰, 得到由若干单跨简支梁组成的基本体系. 这时多余约束

力, 就是对应这些抗弯约束的支座截面内的弯矩, 设为 $M_1, M_2, \dots, M_{i-1}, M_i, M_{i+1}, \dots, M_{n-2}$ 等共 $n-2$ 个基本未知量. 其中, M_1 对应第 2 榀排架处的截面弯矩, M_{n-2} 对应第 $n-1$ 榀排架处的截面弯矩, 第 1 榀排架和第 n 榀排架截面弯矩为 0. M 的方向以使梁下面受拉为正. 取其中 4 跨分析, 计算简图如图 3 所示.

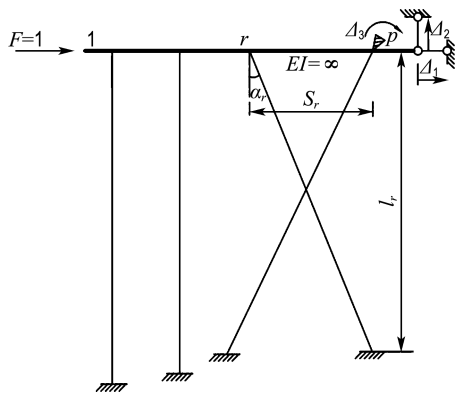


图 2 排架平面示意图

Fig. 2 Plane transverse bent diagram

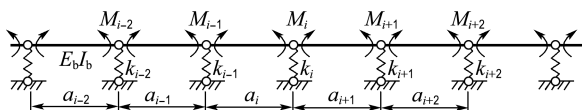


图 3 五弯矩方程求解示意图

Fig. 3 Five-bending moment equation calculation diagram

只承受节点集中力, 弹性支撑连续梁计算的五弯矩方程^[3]为

$$\begin{aligned} M_{i-2} \left(\frac{1}{k_{i-1}} \cdot \frac{1}{a_{i-1} a_i} \right) + M_{i-1} \left[\frac{a_i}{6E_b I_b} - \frac{1}{k_{i-1}} \cdot \frac{1}{a_i} \left(\frac{1}{a_{i-1}} + \frac{1}{a_i} \right) - \frac{1}{k_i} \cdot \frac{1}{a_i} \left(\frac{1}{a_i} + \frac{1}{a_{i+1}} \right) \right] + \\ M_i \left[\left(\frac{a_i}{3E_b I_b} + \frac{a_{i+1}}{3E_b I_b} \right) + \frac{1}{k_{i-1}} \cdot \frac{1}{a_i^2} + \frac{1}{k_i} \left(\frac{1}{a_i} + \frac{1}{a_{i+1}} \right)^2 + \frac{1}{k_{i+1}} \cdot \frac{1}{a_{i+1}^2} \right] + M_{i+1} \left[\frac{a_{i+1}}{6E_b I_b} - \frac{1}{k_i} \cdot \frac{1}{a_{i+1}} \left(\frac{1}{a_i} + \frac{1}{a_{i+1}} \right) - \frac{1}{k_{i+1}} \cdot \frac{1}{a_{i+1}} \left(\frac{1}{a_{i+1}} + \frac{1}{a_{i+2}} \right) \right] + \\ M_{i+2} \left(\frac{1}{k_{i+1}} \cdot \frac{1}{a_{i+1} a_{i+2}} \right) = \\ - \left[\frac{1}{k_{i+1}} \cdot \frac{1}{a_i} R_{i-1}^0 - \frac{1}{k_i} R_i^0 \left(\frac{1}{a_i} + \frac{1}{a_{i+1}} \right) + \frac{1}{k_{i+1}} \cdot \frac{1}{a_{i+1}} R_{i+1}^0 \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $R_{i-1}^0, R_i^0, R_{i+1}^0$ 为刚性支座简支梁基本体系

上,因荷载作用在支座链杆 $i-1, i, i+1$ 内产生的反力。

分配系数为单位力 ($F=1$) 作用下,各支座的反力。当力作用在第 j ($j=1, 2, \dots, n$) 榀排架时,

$$R_i^0 = \begin{cases} 1; & i = j-1 \\ 0; & i \neq j-1 \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)和(6),即可得到关于 $M_1, M_2, \dots, M_{i-1}, M_i, M_{i+1}, \dots, M_{n-2}$ 的 $n-2$ 个方程,继而求解出各支座处弯矩。 j 支座(排架)处分配系数公式为

$$R_j = R_j^0 + M_{j-2} \left(\frac{1}{a_{j-2}} \right) - M_{j-1} \left(\frac{1}{a_{j-1}} + \frac{1}{a_j} \right) + M_j \left(\frac{1}{a_j} \right); \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

当排架间距相等,且各排架的水平刚性系数相等或接近时,式(5)可简化为

$$M_{i-2}\beta + M_{i-1}(1-4\beta) + 2M_i(2+3\beta) + M_{i+1}(1-4\beta) + M_{i+2}\beta = -\beta a(R_{i-1}^0 - 2R_i^0 + R_{i+1}^0) \quad (8)$$

式中: $\beta = 6E_b I_b / a^3 k$, a 为排架间距, k 按照式(4)计算。

分配系数公式可简化为

$$R_j = R_j^0 + \frac{1}{a}(M_{j-2} - 2M_{j-1} + M_j); \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

即对于排架间距相等,且各排架的水平刚性系数相等或接近的高桩码头,水平集中力的横向分力在排架中的分配系数可用式(6)、(8)、(9)联合求解计算。

因为上述公式涉及高阶矩阵求逆、矩阵相乘,设计人员如果手算,费时费力且易出错。因此将公式编制成电子表格,只需输入面板及桩的尺寸和材料参数、排架数目及间距、水平集中力作用的排架编号等,即可直接得到排架水平刚性系数 k 和分配系数。此种方法简单明了,计算准确,适于推广。

2 算例

2.1 窄桩台码头

以天津某码头为依托工程。码头平台面前沿设计高程为 5.5 m,设计泥面高程 -7.0 m。码头结构段长 68.9 m,宽 7.98 m。共有 12 榀排架,排

架间距为 6.2 m。桩基采用 600 mm × 600 mm 预应力混凝土空心方桩,内径 270 mm。上部结构混凝土强度等级 C40,基桩混凝土强度等级 C50。结构断面图如图 4 所示。

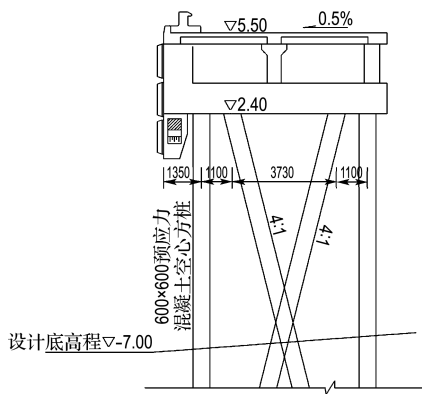


图4 天津某码头断面图

Fig. 4 Cross-section diagram of Tianjin wharf

上部结构:弹性模量 E_b 、泊松比和密度分别取 3.25×10^4 MPa、0.20 和 2500 kg/m³。板厚 $h=0.6$ m,板宽 $b=7.98$ m。 $I_b=25.408$ m⁴。

基桩:弹性模量 E_c 、泊松比和密度分别取 3.45×10^4 MPa、0.20 和 2500 kg/m³。截面面积 $A_c = \left(0.6^2 - \frac{\pi \cdot 0.27^2}{4} \right) \text{ m}^2 = 0.303 \text{ m}^2$,截面惯性矩 $I_c = \left(\frac{0.6^4}{12} - \frac{\pi \cdot 0.27^4}{64} \right) \text{ m}^4 = 0.011 \text{ m}^4$ 。斜桩倾斜角度 $\tan \alpha = 1/4$ 。

桩长的确定:桩长采用《港口工程桩基规范》^[4]中的 m 法进行计算,即弹性长桩的受弯嵌固点以上为模型中桩长,嵌固点采用固端约束。经计算,本文算例条件下嵌固点距离泥面深度 5.10 m。所以桩的竖直高度 $l=14.50$ m。

2.1.1 排架水平刚性系数 k 计算 采用通用软件 ANSYS 建立单榀排架的有限元模型,不考虑面板和纵梁作用,横梁选择 solid45 实体单元模拟,码头基桩选择 beam188 梁单元模拟^[5]。在横梁上施加单位水平集中力,计算出排架水平位移为 2.033×10^{-8} m,由此得出排架的水平刚性系数 $k = 1/(2.033 \times 10^{-8}) \text{ N/m} = 4.919 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。

用本文公式编制成的电子表格计算,只需要输入各桩参数。码头各排架基桩布置相同,每榀排架有 4 根桩($p=4$),各桩的材料和尺寸参数如表 1 所示。

表 1 天津某码头各桩计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of piles of Tianjin wharf

桩	桩长 l/m	竖直夹角 α/rad	距桩 p 距离 s/m	$\cos \alpha$	$\sin \alpha$	$E_c A_c/10^{10} \text{ N}$	$E_c I_c/(10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^2)$
1	14.5	0	5.93	1	0	1.04	3.80
2	14.5	0.245	4.83	0.970	0.243	1.04	3.80
3	14.5	0.245	1.10	0.970	0.243	1.04	3.80
4	14.5	0	0	1	0	1.04	3.80

输入各桩计算参数后,可以直接得到排架的水平刚性系数

$$k=1/\Delta_1=4.835\times10^7\text{ N/m}$$

与 ANSYS 计算结果误差为 $(4.835-4.919)/4.919=-1.7\%$,说明本文推导的排架水平刚性系数公式较为精确.

2.1.2 分配系数计算 将水平集中力分别作用在第 1 榀($j=1$)排架和第 6 榀($j=6$)排架,用以下 3 种方法分别计算分配系数.

(1)ANSYS 整体建模计算

采用通用软件 ANSYS 进行计算,上部结构选择 solid45 实体单元模拟,码头基桩选择 beam188 梁单元模拟^[5].计算水平集中力作用下,每榀排架中基桩嵌固点的支座反力之和与施加的水平力的比值,获得各排架的水平力分配系数^[6].

(2)规范计算

根据《高桩码头设计与施工规范》^[1],将码头上部结构在水平方向视为一个刚性连续梁($EI=\infty$),排架简化为支撑弹簧,计算荷载作用下各弹簧的支座反力,即为各排架的水平力分配系数.

(3)本文方法计算

由 2.1.1 已得到排架的水平刚性系数 $k=4.835\times10^7\text{ N/m}$,计算水平力在排架中的分配系数还需要输入的数据有码头面板的弹性模量 E_b 、码头宽度 b 、面板厚度 h 、排架数目 n 、排架间距 a 、受力排架编号 j .由这些数据可以得出

$$\beta=6E_bI_b/a^3k=429.940$$

进而得到各支座反力即分配系数.

以上 3 种方法求得的分配系数见表 2.

由表 2 可以看出,当受力排架为排架 1($j=1$)即力作用在端部排架时,排架 1 为最不利排架,此时得到的分配系数为最不利分配系数.按照 ANSYS 整体建模计算,最不利分配系数为 0.384;按照规范计算,最不利分配系数为 0.295,相对 ANSYS 整体建模计算结果的误差为 $(0.295-0.384)/0.384=-23.2\%$,因此如果按照规范进行码头设计,将存在安全隐患;按照本文方法计算,最不利分配系数为 0.389,相对 ANSYS 整体建模计算结果的误差为 $(0.389-0.384)/0.384=1.3\%$.

表 2 3 种方法计算得到的天津某码头分配系数

Tab. 2 Distribution coefficients of Tianjin wharf calculated by three methods

受力排架	方法	各排架分配系数											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	ANSYS 整体建模	0.384	0.275	0.200	0.146	0.101	0.063	0.031	0.004	-0.020	-0.040	-0.061	-0.082
	规范	0.295	0.256	0.218	0.179	0.141	0.103	0.064	0.026	-0.013	-0.051	-0.090	-0.128
	本文方法	0.389	0.298	0.215	0.144	0.086	0.043	0.011	-0.012	-0.028	-0.040	-0.049	-0.057
6	ANSYS 整体建模	0.062	0.074	0.085	0.098	0.117	0.142	0.114	0.092	0.076	0.062	0.047	0.031
	规范	0.103	0.099	0.096	0.092	0.089	0.085	0.082	0.078	0.075	0.071	0.068	0.064
	本文方法	0.043	0.067	0.090	0.111	0.127	0.133	0.126	0.109	0.087	0.062	0.037	0.011

当受力排架为排架 6($j=6$)时,如果按照规范,最不利排架仍是排架 1,最大分配系数为 0.103;但 ANSYS 整体建模和本文方法计算得到的分配系数显示,排架 6 才是最不利排架,最大分

配系数分别为 0.142 和 0.133.最大分配系数对比,规范相对于 ANSYS 整体建模计算的误差为 $(0.103-0.142)/0.142=-27.5\%$,本文方法计算相对于 ANSYS 整体建模计算的误差为 $(0.133$

$-0.142)/0.142=-6.3\%$ 。

所以,相比规范,本文方法更加符合结构受力特点,且比规范更加安全可靠,推荐使用此方法进行窄桩台码头设计。

2.2 宽桩台码头

以黄泽山某万吨级成品油码头为例,码头断面图如图 5 所示。工作平台平面尺寸 50 m×20 m,采用高桩梁板结构,排架间距为 7.5 m,共由 7 榀排架组成。每榀排架布置 5 根桩:一对叉桩、一对半叉桩和一根斜桩,桩基采用 $\phi 1\,000$ PHC 桩。上部结构采用现浇横梁、预制纵向梁、叠合面板的形式。上部结构混凝土强度等级 C40,基桩混凝土强度等级 C80。

上部结构:弹性模量 E_b 、泊松比和密度分别取 3.25×10^4 MPa、0.20 和 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 。板厚 $h=0.5\text{ m}$,板宽 $b=20\text{ m}$ 。 $I_b=333.333\text{ m}^4$ 。

基桩:弹性模量 E_c 、泊松比和密度分别取 3.90×10^4 MPa、0.20 和 $2\,500\text{ kg/m}^3$ 。截面面积 $A_c=0.355\text{ m}^2$,截面惯性矩 $I_c=0.034\text{ m}^4$ 。斜桩倾斜角度 $\tan\alpha=1/4$ 。

桩长的确定:经计算,本算例条件下嵌固点距

离泥面深度 6.20 m。
将水平集中力分别作用在第 1 榀($j=1$)排架和第 3 榀($j=3$)排架,比较 ANSYS 整体建模、规范和本文方法计算得到的分配系数。

用本文编制的电子表格计算时,需要输入的各桩计算参数如表 3 所示。

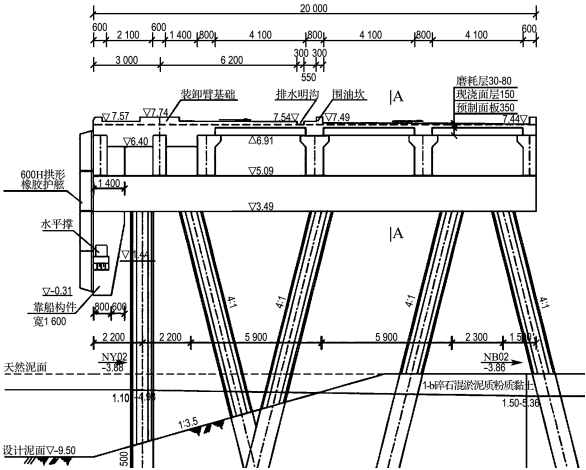


图 5 黄泽山某码头断面图

Fig. 5 Cross-section diagram of Huang Zeshan wharf

表 3 黄泽山某码头各桩计算参数

Tab. 3 Calculation parameters of piles of Huang Zeshan wharf

桩	桩长 l/m	竖直夹角 α/rad	距桩 p 距离 s/m	$\cos\alpha$	$\sin\alpha$	$E_c A_c/10^{10}\text{ N}$	$E_c I_c/(10^9\text{ N}\cdot\text{m}^2)$
1	18.56	0	16.30	1	0	1.38	1.33
2	17.15	0.245	14.10	0.970	0.243	1.38	1.33
3	16.97	0.245	8.20	0.970	0.243	1.38	1.33
4	13.55	0.245	2.30	0.970	0.243	1.38	1.33
5	13.55	0.245	0	0.970	0.243	1.38	1.33

由此得出排架水平刚性系数 $k=1/\Delta_1=4.649\times 10^7$,ANSYS 单榀排架建模计算结果为 4.854×10^7 ,两者误差为 $(4.649-4.854)/4.854=-4.2\%$ 。

再输入:码头面板的弹性模量 E_b 、码头宽度 b 、面板厚度 h 、排架数目 n 、排架间距 a 、受力排架编号 j 。由这些数据可以得出 $\beta=6E_b I_b/a^3 k=3\,314.206$ 。

进而得到各支座反力即分配系数。

以上 3 种方法求得的分配系数见表 4。由表 4 可以看出,对于宽桩台码头,当受力排架为排架 1 ($j=1$)即力作用在端部排架时,排架 1 为最不利

排架,此时得到的分配系数为最不利分配系数。按照 ANSYS 整体建模计算,最不利分配系数为 0.467;按照规范计算,最不利分配系数为 0.465,相对 ANSYS 整体建模计算结果的误差为 -0.4% ,在可接受的误差范围内,说明此码头可以用规范求解;按照本文方法计算,最不利分配系数为 0.467,与 ANSYS 整体建模计算结果相同,因此本文方法对宽桩台码头同样适用。

当受力排架为排架 3($j=3$)时,排架 1 仍是最不利排架,这与 2.1 算例中的窄桩台码头不同。按照 ANSYS 整体建模、规范和本文方法计算,最不利分配系数分别为 0.244、0.250、0.248,规范

表 4 3 种方法计算得到的黄泽山某码头分配系数
Tab. 4 Distribution coefficients of Huang Zeshan wharf calculated by three methods

受力排架	方法	各排架分配系数						
		1	2	3	4	5	6	7
1	ANSYS 整体建模	0.467	0.353	0.244	0.138	0.034	−0.067	−0.169
	规范	0.465	0.357	0.250	0.143	0.034	−0.071	−0.178
	本文方法	0.467	0.357	0.248	0.141	0.034	−0.071	−0.176
3	ANSYS 整体建模	0.244	0.213	0.183	0.146	0.109	0.072	0.034
	规范	0.250	0.214	0.179	0.143	0.107	0.071	0.034
	本文方法	0.248	0.214	0.180	0.144	0.108	0.071	0.034

相对 ANSYS 整体建模计算结果误差为 $(0.250 - 0.244)/0.244 = 2.5\%$, 本文方法相对 ANSYS 整体建模计算结果误差为 $(0.248 - 0.244)/0.244 = 1.6\%$.

所以, 计算宽桩台码头的水平力分配系数, 用规范或者本文方法皆可.

3 规范适用范围

由 2.1 和 2.2 两个算例可知, 现行规范对于宽桩台码头是适用的, 但对于窄桩台码头误差较大. 那么, 该如何判断一个码头是宽桩台还是窄桩台? 本文公式推导过程中曾用到的量纲一参数 $\beta = 6E_b I_b / a^3 k$, 可以反映码头上部结构与排架在水平方向上的刚度比, 以此作为计算参数, β_{cr} 为界定码头宽、窄的临界参数. 当 $\beta \geq \beta_{cr}$ 时, 码头为宽桩台码头, 上部结构在水平方向上的刚度可以看作无穷大, 符合规范假定; 当 $\beta < \beta_{cr}$ 时, 码头为窄桩台码头, 上部结构在水平方向上的刚度不能再看作无穷大, 规范不再适用. 为确定 β_{cr} 数值, 改变码头的各项参数使 β 改变, 并建立与之对应的有限元模型, 计算分配系数, 比较规范相对于 ANSYS 整体建模结果的误差. 当误差刚好不大于 5% 时, 规范适用, 此时对应的 β 即为临界值. 经过大量的计算发现, 码头分段跨数不同, β_{cr} 不同, 如表 5 所

表 5 规范适用要求的 β_{cr}
Tab. 5 β_{cr} required by specification

码头分段跨数	β_{cr}
5	200
6	400
7	600
8	1 000
9	1 800
10	2 600
11	3 600

示. 算例 2.1 中 11 跨码头 $\beta = 429.940 < 3\,600 = \beta_{cr}$, 所以此码头为窄桩台码头, 规范不再适用, 应按照本文方法计算. 算例 2.2 中 6 跨码头 $\beta = 3\,314.206 > 400 = \beta_{cr}$, 为宽桩台码头, 依据规范计算即可取得较好精度. 由这两个算例也可以看出, 相比规范, 本文方法适用范围更广.

4 结 论

- (1) 提出排架水平刚性系数计算公式, 经验证, 此公式计算准确, 简洁实用.
- (2) 用五弯矩方程求解弹性支撑连续梁, 荷载只有作用在节点处的单位集中力, 求解得到的支座反力即为分配系数; 并编制成电子表格, 只需输入面板及桩的尺寸和材料参数、排架数目及间距、水平集中力作用的排架编号, 即可直接得到分配系数.
- (3) 确定了规范适用范围. 令 $\beta = 6E_b I_b / a^3 k$, 反映码头上部结构与排架在水平方向上的刚度比, 并得出不同码头分段跨数下界定宽、窄码头的临界参数 β_{cr} . 当 $\beta \geq \beta_{cr}$ 时, 码头为宽桩台码头, 上部结构在水平方向上可视为刚性连续梁, 规范适用; 当 $\beta < \beta_{cr}$ 时, 码头为窄桩台码头, 上部结构在水平方向上可视为柔性连续梁, 规范不再适用.
- (4) 对于窄桩台码头, 规范计算得到的最不利分配系数偏小, 可能存在安全隐患. 而且对于宽度较小、分段跨数较多的码头, 最不利排架可能为力所作用的排架, 与规范中最不利排架始终为端部排架不同.
- (5) 本文给出的简化公式对宽桩台码头同样适用.

用本文提出的电子表格计算分配系数, 简单方便, 安全合理. 建议以此取代规范, 为水平力在高桩码头排架中的分配设计提供新的依据.

参考文献：

[1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2010.
CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd. JTS 167-1—2010 Design and Construction Code of High-piled Wharf [S]. Beijing: China Communications Press, 2010. (in Chinese)

[2] 张祖贤,朱秀峰,王炳煌. 水平力在码头排架中的分配试验研究[J]. 水运工程, 1991(12):13-19.
ZHANG Zu-xian, ZHU Xiu-feng, WANG Bing-huang. Experiment on distribution of horizontal force in the bents of wharf [J]. **Port & Waterway Engineering**, 1991(12):13-19. (in Chinese)

[3] 华东水利学院结构力学教研组. 结构力学:上册[M]. 北京:水利出版社, 1981.
Structural Mechanics Research Group of East China Institute of Water Conservancy. **Structural Mechanics: I** [M]. Beijing: China Hydraulic Press,

1981. (in Chinese)

[4] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. JTS 167-4—2012 港口工程桩基规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2012.
CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd. JTS 167-4—2012 Code for Pile Foundation of Harbor Engineering [S]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)

[5] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
WANG Xin-min. **Numerical Analysis of ANSYS Engineering Structure** [M]. Beijing: China Communications Press, 2007. (in Chinese)

[6] 钟小帅,鲁子爱,沈锦林. 水平力在高桩码头排架中的分配系数研究[J]. 水运工程, 2011(7):76-82.
ZHONG Xiao-shuai, LU Zi-ai, SHEN Jin-lin. On distribution coefficient of horizontal force in the bents of high-piled wharf [J]. **Port & Waterway Engineering**, 2011(7):76-82. (in Chinese)

Research on distribution of horizontal force in bents
of narrow piled platform wharf

CHEN Ting-guo*, XU Feng-jiao, HOU Yong-wei

(School of Civil Engineering, Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new simplified model for the distribution coefficient of horizontal concentrated force in the bents of narrow high-piled platform wharf is built and solved. When determining the distribution coefficient, bents can be simplified as spring supports. The superstructure of the dock can't be simplified as reinforcing beam any more, elastic continuous beam instead. Horizontal rigidity coefficient of frame bent and the formula solving the elastic continuous beam are put forward and compiled into spreadsheet. Parameters such as terminal sizes and material properties are input and distribution coefficients are displayed. For narrow piled platform wharf, the most unfavorable bent may no longer be the head bent, and the most unfavorable distribution coefficient given by specification is smaller than actual value, which is likely to cause an accident. The experimental results show that the spreadsheet can improve design precision, ensure the safety of the structure. The research offers a reference for structure design and standard revision.

Key words: narrow piled platform; horizontal rigidity coefficient; elastic continuous beam; distribution coefficient; spreadsheet