

# 低承台桩基墩柱式结构 水平荷载作用下的桩基计算

章少兰, 胡彧元

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

**摘要:** 某船闸靠船墩结构采用低承台桩基墩柱式结构。按照《建筑桩基技术规范》考虑承台、基桩协同工作和土的弹性抗力作用计算受水平荷载的桩基内力及位移, 内含大量插值查表, 计算复杂, 具有一定的人为偏差。采用 STAAD. PRO 软件建立桩基、承台及土单元模型, 并将上部墩柱结构及荷载进行力学转换后作用于承台, 分析低承台桩基墩柱式结构桩基内力及位移, 并与工程实例计算结果对比。结果表明, STAAD. PRO 计算结果与规范计算结果基本一致, 工程实践中可使用该软件方便地计算低承台桩基墩柱式结构水平荷载作用下的内力及位移。

**关键词:** 低承台桩基墩柱式结构; 水平荷载; 桩、土与承台共同作用

中图分类号: U 641.2; TU 473.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0188-06

## Calculation of pile foundation of pile cap pier column structure under horizontal load

ZHANG Shao-lan, HU Yu-yuan

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

**Abstract:** The low pile cap pier column structure is adopted in the berthing pier structure of a ship lock. According to *Technical Code for Building Pile Foundations*, the internal force and displacement of pile foundation are calculated according to the calculation method of pile foundation under horizontal load considering the cooperative work of pile cap and foundation pile and the elastic resistance of soil, which is complex and has certain human deviation because of large amount of interpolation and look-up table. We establish the pile foundation, pile cap and soil model by STAAD. PRO software, convert the upper pier column structure and load to stress acting on the pile cap, analyze the internal force and displacement of the pile foundation of low pile cap pier column structure, and compare the code results with the results of engineering examples. The results show that the calculation results of STAAD. PRO are basically consistent with the code results. In the engineering practice, the software can be used to calculate the internal force and displacement of a low pile cap under horizontal load.

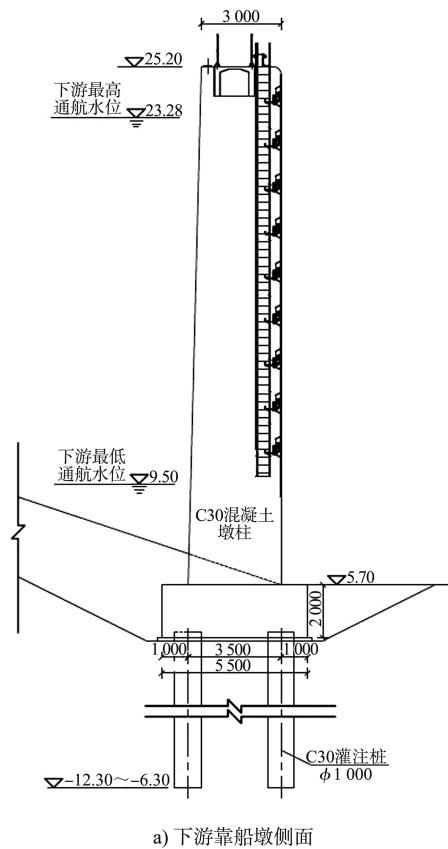
**Keywords:** low pile cap pier column structure; horizontal load; interaction of pile, soil and pile cap

桩基是在各种高层建筑、厂房、码头、桥梁及有特殊要求的建筑物中被广泛采用的一种基础形式。桩基通常由桩和承台组成, 根据承台与地面的相对位置的不同, 可分为低承台桩基与高承台桩基。低承台桩基承受荷载的能力比高承台好,

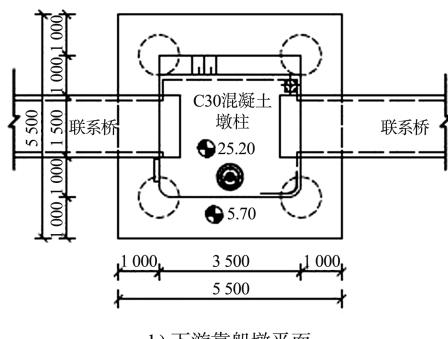
特别是在水平荷载作用下, 低承台桩基承台周围的土体可以发挥一定的作用。一般工业及民用建筑常采用低承台桩基, 港口及桥梁工程则由于水深较大、地面较低、不具备干地施工条件等因素常采用承台位于自然地面以上的高承台桩基。

## 1 工程概况

某船闸引航道最高通航水位 23.28 m, 最低通航水位 9.50 m, 靠船墩结构顶高程 25.20 m, 底高程 5.70 m。结构建基面坐落于细砂及砂卵砾石层, 地基承载力特征值分别为 150~180 kPa 和 250~300 kPa, 下伏土层分别为全风化千枚岩、强风化千枚岩及中风化千枚岩。考虑到细砂承载力较低且易被淘刷, 结构基础形式选择灌注桩基础嵌入中风化千枚岩中, 又由于船闸结构为干地施工, 具备承台位于地面以下的条件, 因此本工程靠船墩结构采用低承台桩基墩柱式结构, 见图 1。



a) 下游靠船墩侧面



b) 下游靠船墩平面

图 1 低承台桩基靠船墩结构 (高程: m; 尺寸: mm)

## 2 船闸靠船墩结构受力分析

船闸靠船墩结构各工况主要作用有自身重力、浮托力、船舶撞击力或系缆力, 具体作用及作用工况见表 1。

表 1 船闸靠船墩结构受力情况

工况	自重	浮托力	撞击力	系缆力
完建	✓	-	-	-
最低通航水位	撞击力工况	✓	✓	-
	系缆力工况	✓	✓	✓
最高通航水位	撞击力工况	✓	✓	-
	系缆力工况	✓	✓	✓

本工程设计船型为 2 000 吨级船舶, 船舶撞击力、系缆力按《船闸水工建筑物设计规范》<sup>[1]</sup>确定, 根据计算本工程靠船墩结构撞击力为 370 kN, 系缆力为 150 kN。

完建工况仅有结构自身重力, 无水平荷载, 桩基竖向力最大, 弯矩最小。最高通航水位结构浮托力大, 船舶荷载作用位置高, 水平力弯矩大。根据计算分析比较, 完建工况桩基轴力大, 无水平剪力及弯矩, 而最高通航水位撞击力作用工况桩基轴力小, 弯矩大, 为桩基配筋控制工况, 以下计算分析以此工况为例。

## 3 现行规范对桩基水平力作用下的计算

《码头结构设计规范》<sup>[2]</sup>附录 B 根据水平力作用下桩身内力和变形的不同关系分别给出了不同的水平力作用下单桩的计算方法, 包括  $m$  法, NL 法及  $p-y$ (反力-位移)曲线法。这些方法均只考虑桩土的相互作用而未考虑承台的作用, 显然这更适合于高承台桩基结构, 对于低承台桩基结构的设计是一种偏于安全的做法。

《建筑桩基技术规范》附录 C 给出了考虑承台(包括地下墙体)、基桩协同工作和土的弹性抗力作用计算受水平荷载的基桩的计算方法。

### 3.1 基本假定

1) 将土体视为弹性介质, 其水平抗力系数随深度线性增加( $m$  法), 桩顶高程处水平抗力系数为 0。

2) 在水平力和竖向压力作用下, 基桩、承台、

地下墙体表面上任一点的接触应力(法向弹性抗力)与该点的法向位移成正比。

3)忽略桩身、承台、地下墙体侧面与土之间的黏着力和摩擦力对抵抗水平力的作用。

4)按复合桩基设计时,可考虑承台底土的竖向抗力和水平摩擦力。

5)桩顶与承台刚性连接(固接),承台的刚度视为无穷大。

### 3.2 基本计算参数

1)地基土水平抗力系数的比例系数  $m$ 。

2)桩底面地基土竖向抗力系数的比例系数  $m_0$ ,近似取  $m_0=m$ 。

3)承台侧面地基土水平抗力系数  $C_n=mh_n$ ,其中  $h_n$  为承台埋深。

4)承台底地基土竖向抗力系数  $C_b=m_0h_n\eta_c$ ,其中  $\eta_c$  为承台效应系数。

5)桩底面地基土竖向抗力系数  $C_0=m_0h$ ,其中  $h$  为桩的入土深度;岩石地基的竖向抗力系数  $C_R$ ,根据岩石饱和单轴抗压强度标准值查表得到。

6)桩身抗弯刚度  $EI$ 。

7)桩身轴向压力传递系数  $\xi_N$ 。

8)地基土与承台底之间的摩擦系数  $\mu$ 。

### 3.3 计算步骤及公式

1)确定荷载和计算图示。

2)确定基本计算参数  $m$ 、 $m_0$ 、 $h_n$ 、 $\eta_c$ 、 $h$ 、 $EI$ 、 $\xi_N$ 、 $C_n$ 、 $C_b$ 、 $C_0$  或  $C_R$ 、 $\mu$ 。

3)求解单位力作用于桩顶时,桩顶产生的变位。

当单位水平力  $H=1$  作用时,桩顶水平位移  $\delta_{HH}$  及转角  $\delta_{MH}$  的公式分别为:

$$\delta_{HH} = \frac{1}{\alpha^3 EI} \cdot \frac{(B_3 D_4 - B_4 D_3) + K_h (B_2 D_4 - B_4 D_2)}{(A_3 B_4 - A_4 B_3) + K_h (A_2 B_4 - A_4 B_2)} \quad (1)$$

$$\delta_{MH} = \frac{1}{\alpha^2 EI} \cdot \frac{(A_3 D_4 - A_4 D_3) + K_h (A_2 D_4 - A_4 D_2)}{(A_3 B_4 - A_4 B_3) + K_h (A_2 B_4 - A_4 B_2)} \quad (2)$$

当单位弯矩  $M=1$  作用时,桩顶水平位移  $\delta_{HM}$  及转角  $\delta_{MM}$  的公式分别为:

$$\delta_{HM} = \delta_{MH}$$

$$\delta_{MM} = \frac{1}{\alpha EI} \cdot \frac{(A_3 C_4 - A_4 C_3) + K_h (A_2 C_4 - A_4 C_2)}{(A_3 B_4 - A_4 B_3) + K_h (A_2 B_4 - A_4 B_2)} \quad (3)$$

当桩底嵌固于基岩中时,  $\delta_{HH}$ 、 $\delta_{MH}$ 、 $\delta_{HM}$ 、 $\delta_{MM}$  分别按下列公式计算:

$$\delta_{HH} = \frac{1}{\alpha^3 EI} \cdot \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (4)$$

$$\delta_{MH} = \delta_{HM} = \frac{1}{\alpha^2 EI} \cdot \frac{A_2 D_1 - A_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (5)$$

$$\delta_{MM} = \frac{1}{\alpha EI} \cdot \frac{A_2 C_1 - A_1 C_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (6)$$

式中:  $A_1$ 、 $\cdots$ 、 $D_4$  为相关参数,均可根据桩的换算深度  $\bar{h}=\alpha h$  查表确定,  $\alpha$  为桩的水平变形系数,其值为  $\sqrt{\frac{mb_0}{EI}}$ , 其中  $b_0$  为桩身的计算宽度;  $K_h$  为系数,其值为  $C_0 I_0 / \alpha EI$ , 其中  $C_0$  为桩底面地基土竖向抗力系数,  $I_0$  为桩底截面惯性矩,对于非扩底桩  $I_0=I$ 。

4)求解桩顶发生单位变位时,在桩顶引起的内力。

发生单位竖向位移时,桩顶轴向力公式为:

$$\rho_{NN} = \frac{1}{\frac{\xi_N h}{EA} + \frac{1}{C_0 A_0}} \quad (7)$$

式中:  $A$  为桩身横截面面积;  $E$  为弹性模量;  $A_0$  为单桩桩底压力分布面积,对于端承桩  $A_0$  为单桩的底面积。

发生单位水平位移时,桩顶水平力及弯矩的公式分别为:

$$\rho_{HH} = \frac{\delta_{MM}}{\delta_{HH} \delta_{MM} - \delta_{MH}^2} \quad (8)$$

$$\rho_{MH} = \frac{\delta_{MH}}{\delta_{HH} \delta_{MM} - \delta_{MH}^2} \quad (9)$$

发生单位转角时,桩顶水平力及弯矩的公式分别为:

$$\rho_{HM} = \rho_{MH} \quad (10)$$

$$\rho_{MM} = \frac{\delta_{HH}}{\delta_{HH} \delta_{MM} - \delta_{MH}^2} \quad (11)$$

5)求解承台发生单位变位时所有桩顶、承台和侧墙引起的反力和。

发生单位竖向位移时,桩顶、承台和侧墙引

起的竖向反力和及水平反力和的公式分别:

$$\gamma_{VV} = n\rho_{NN} + C_b A_b \quad (12)$$

$$\gamma_{UV} = \mu C_b A_b \quad (13)$$

发生单位水平位移时, 桩顶、承台和侧墙引起的水平反力和及反弯矩和的公式分别为:

$$\gamma_{UU} = n\rho_{HH} + B_0 F^c \quad (14)$$

$$\gamma_{\beta U} = -n\rho_{MH} + B_0 S^c \quad (15)$$

发生单位转角时, 桩顶、承台和侧墙引起的水平反力和及反弯矩和的公式分别为:

$$\gamma_{U\beta} = \gamma_{\beta U} \quad (16)$$

$$\gamma_{\beta\beta} = n\rho_{MM} + \rho_{NN} \sum_{i=1}^n K_i x_i^2 + B_0 I^c + C_b I^f \quad (17)$$

式中:  $A_b$  为承台底与地基土的接触面积,  $A_b = F - nA$ , 其中  $F$  为承台底面积,  $nA$  为各基桩桩顶横截面积和,  $n$  为基桩数;  $B_0$  为  $B+1$ , 其中  $B$  为垂直于力作用面方向的承台宽;  $K_i$  为第  $i$  排桩的桩数;  $x_i$  为坐标原点(桩群对称点上)至各桩的距离;  $F^c$ 、 $S^c$ 、 $I^f$  分别为承台底面以上侧向水平抗力系数  $C$  图形的面积、对于底面的面积矩、惯性矩, 按以下公式计算:

$$F^c = C_n h_n / 2 \quad (18)$$

$$S^c = C_n h_n^2 / 6 \quad (19)$$

$$I^f = C_n h_n^3 / 12 \quad (20)$$

6) 求解承台的变位。

竖向位移的计算公式为:

$$V = \frac{(N+G)}{\gamma_{VV}} \quad (21)$$

水平位移的计算公式为:

$$U = \frac{\gamma_{\beta\beta} H - \gamma_{U\beta} M}{\gamma_{UU} \gamma_{\beta\beta} - \gamma_{U\beta}^2} - \frac{(N+G) \gamma_{UV} \gamma_{\beta\beta}}{\gamma_{VV} (\gamma_{UU} \gamma_{\beta\beta} - \gamma_{U\beta}^2)} \quad (22)$$

转角的计算公式为:

$$\beta = \frac{\gamma_{UU} M - \gamma_{U\beta} H}{\gamma_{UU} \gamma_{\beta\beta} - \gamma_{U\beta}^2} + \frac{(N+G) \gamma_{UV} \gamma_{U\beta}}{\gamma_{VV} (\gamma_{UU} \gamma_{\beta\beta} - \gamma_{U\beta}^2)} \quad (23)$$

式中:  $N$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $M$  分别为群桩顶上部荷载竖向力、自身重力、水平力及弯矩。

7) 求解任一基桩的桩顶内力。

桩顶轴向力的计算公式为:

$$N_{0i} = (V + \beta x_i) \rho_{NN} \quad (24)$$

桩顶水平力的计算公式为:

$$H_{oi} = U \rho_{HH} - \beta \rho_{HM} \quad (25)$$

桩顶弯矩的计算公式为:

$$M_{oi} = \beta \rho_{MM} - U \rho_{MH} \quad (26)$$

8) 求任一基桩桩身最大弯矩及其位置。计算公式为:

$$Y_{M_{max}} = \frac{\alpha y}{\alpha} \quad (27)$$

$$M_{max} = H_0 / D_{11} \quad (28)$$

式中:  $\alpha y$  和参数  $D_{11}$  可查表得出。

### 3.4 规范计算及结果

本工程地基土水平抗力系数的比例系数  $m = 2.750 \text{ MN/m}^3$ , 承台埋深  $h_n$  为 2 m, 桩的入土深度  $h$  为 10 m, 桩底深入岩石, 岩石地基的竖向抗力系数根据岩石饱和单轴抗压强度标准值求得  $C_k = 9701.875 \text{ MN/m}^3$ , 地基土与承台底之间的摩擦系数  $\mu$  根据地质条件取 0.35。

确定基本参数, 承台侧面地基土水平抗力系数  $C_n = 5.500 \text{ MN/m}^3$ , 承台底地基土竖向抗力系数  $C_b = 739 \text{ kN/m}^3$ , 桩身抗弯刚度  $EI = 1162.520 \text{ MN/m}^2$ , 桩身轴向压力传递系数  $\xi_n$  取 1。

根据设计条件及基本参数, 计算内容为: 水平单位力及弯矩单位力作用于桩顶时, 桩顶产生的水平位移及转角; 桩顶发生单位竖向位移时桩顶引起的轴向力, 桩顶发生单位水平位移及单位转角时桩顶引起的水平力及弯矩; 承台发生单位竖向位移时桩顶、承台和侧墙引起的竖向反力和、水平反力和, 承台发生单位水平位移及转角时桩顶、承台和侧墙引起的水平反力和、弯矩反力和; 承台竖向、水平及转角变位; 基桩桩顶轴向力、水平力及弯矩; 基桩桩身最大弯矩及其位置。

经计算, 最高通航水位撞击力作用下该靠船墩桩基内力及位移结果为: 桩顶轴向力  $N = 1.915 \text{ MN}$ 、桩顶水平力  $F = 69.9 \text{ kN}$ 、桩顶弯矩  $M = 129.7 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、桩身最大弯矩  $M_{max} = 215 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 、桩顶水平位移为 2.23 mm。

## 4 STAAD. PRO 有限元软件模拟及计算

### 4.1 模型建立

STAAD. PRO (structural analysis and design, 结

构分析和设计)软件可对钢、木、铝、混凝土等各种材料构成的框架、塔架、桁架、网架(壳)、悬索等各类结构进行线性、非线性静力、反应谱及时程反应分析。国内外高桩码头普遍采用该软件进行分析计算。

为简化软件计算,低承台桩基墩柱式靠船墩结构仅建立桩基及承台模型,承台上部墩柱结构按其自身重力进行力学转换,施加于承台上部。桩基及承台分别按实际尺寸及材料分别建立梁系及板单元。桩基单元桩径为1.0 m,混凝土强度等级C30,承台板单元板厚为2.0 m,混凝土强度等级C30,有限元模型如图2。

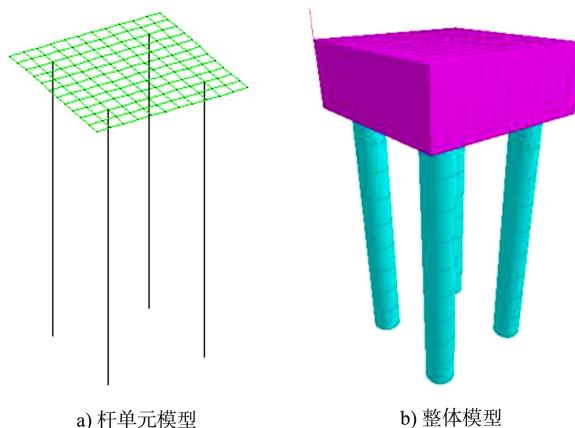


图2 低承台桩基靠船墩结构模型

## 4.2 土弹簧模拟

承台、桩基和土的弹性抗力作用分别按《建筑桩基技术规范》<sup>[3]</sup>承台侧面地基土水平抗力系数 $C_n$ 、承台底地基土竖向抗力系数 $C_b$ 、桩底地基土竖向抗力系数 $C_0/C_R$ 及《码头结构设计规范》中桩基地基土水平抗力系数 $K=mz$ 计算并输入模型,如图3所示。

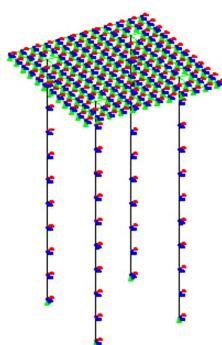


图3 承台、桩基和土的作用模型

其中承台侧面地基土水平抗力系数 $C_n=5.500 \text{ MN/m}^3$ ,承台侧宽5.5 m,模型节点12个,则承台侧面模型单节点地基土x、y向水平抗力系数 $C_{nix}=C_{nyi}=2.520 \text{ MN/m}^3$ 。

承台底地基土竖向抗力系数 $C_b=739 \text{ kN/m}^3$ ,承台底面积30.25 m<sup>2</sup>,模型节点144个,则承台底面模型单节点地基土竖向抗力系数 $C_{biz}=155 \text{ kN/m}^3$ ;地基土与承台底之间的摩擦系数 $\mu=0.35$ ,则承台底面模型单节点地基土x、y向水平抗力系数 $C_{bix}=C_{biy}=54 \text{ kN/m}^3$ 。桩底地基土竖向抗力系数 $C_R=9701.875 \text{ MN/m}^3$ 。

桩基地基土水平抗力系数 $K=mz$ ,并考虑桩基计算宽度,桩基每1 m建立一个梁单元,则随深度每个单元的水平抗力系数分别为4.950、9.900、14.850、19.800、24.750、29.700、34.650、39.600、44.550、49.500 MN/m<sup>3</sup>。

## 4.3 上部墩柱及荷载模拟

将承台上部墩柱结构自身重力及其荷载进行力学转换,施加于承台上部。

经计算,上部墩柱结构自身重力 $G=3.308 \text{ MN}$ ,对承台中心弯矩 $M=426 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,根据力学公式:

$$G/B = (\sigma_1 + \sigma_2) h/2 \quad (29)$$

$$M/B = (\sigma_2 - \sigma_1) h^2/12 \quad (30)$$

式中: $B$ 为墩柱底宽,取3.5 m。求得上部墩柱结构自身重力引起承台所受竖向应力大值 $\sigma_2=329.74 \text{ kPa}$ 、小值 $\sigma_1=210.45 \text{ kPa}$ ,将墩柱自身重力施加于模型,见图4。

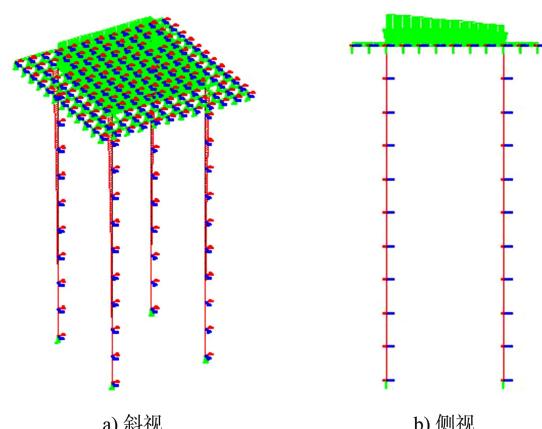


图4 低承台桩基靠船墩自身重力模拟

上部墩柱撞击力为370 kN,作用于承台水平力

$F=370 \text{ kN}$ , 则承台单元水平向应力  $\sigma_x=30.20 \text{ kPa}$ 。

承台中心弯矩  $M=6.875 \text{ MN}\cdot\text{m}$ , 根据力学公式(29)、(30)求得撞击力引起承台所受竖向应力大值  $\sigma_2=962.04 \text{ kPa}$ 、小值  $\sigma_1=-962.04 \text{ kPa}$ , 将墩柱撞击力施加于模型, 见图 5。

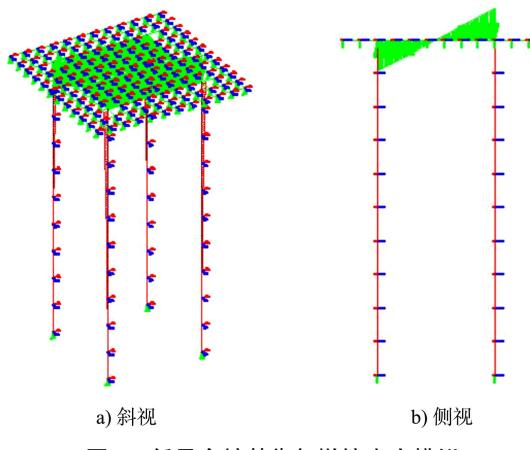


图 5 低承台桩基靠船墩撞击力模拟

#### 4.4 软件分析计算结果

经软件分析计算, 最高通航水位撞击力作用下该靠船墩桩基内力、位移结果与《建筑桩基技术规范》计算结果对比见表 2。

表 2 低承台靠船墩桩基计算结果对比

类型	桩顶轴向力/MN	桩顶水平力/kN	桩顶弯矩/(kN·m)	桩身最大弯矩/(kN·m)	桩顶水平位移/mm
STAAD 结果	2.023	72.85	130.87	205.4	2.32
规范结果	1.915	69.90	129.70	215.0	2.23
偏差/%	5.6	4.2	0.9	4.5	4.1

可以看出, STAAD. PRO 软件计算结果与《建筑桩基技术规范》的计算结果基本一致。

(上接第 187 页)

#### 参考文献:

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司.码头结构设计规范: JTS 167—2018[S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司.高桩码头设计与施工规范: JTS 167-1—2010[S].北京: 人民交通出版社, 2010.

## 5 结论

1)《建筑桩基技术规范》计算低承台桩基结构桩基内力及位移, 计算过程复杂, 内含大量查表插值工作, 容易出现人为偏差, 尤其当工况较多或需要对结构进行优化时, 每调整一个参数都需要重新进行查表插值, 耗时耗力。

2)利用 STAAD. PRO 软件可以很好地对结构及其荷载进行模拟, 并按规范要求模拟承台、基桩和地基土的弹性抗力作用。STAAD. PRO 软件可以通过简单的调整某个设计条件或参数来模拟不同工况及结构的计算。

3)经过计算对比发现, STAAD. PRO 软件计算结果与《建筑桩基技术规范》的计算结果基本一致。因此, 工程实践中可以使用该软件对低承台桩基结构水平荷载作用下桩基的内力及位移进行设计及校核。

#### 参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院.船闸水工建筑物设计规范: JTJ 307—2001 [S].北京: 人民交通出版社, 2002.
- [2] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司.码头结构设计规范: JTS 167—2018 [S].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [3] 中国建筑科学研究院.建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008 [S].北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(本文编辑 王璁)

- [3] 张智洪.关于高桩梁板式码头面板计算的探讨[J].重庆交通大学学报, 1991, 10(4): 85-95.
- [4] 《建筑结构静力计算手册》编写组.建筑结构静力计算手册[M].2 版.北京: 中国建筑工业出版社, 1998.
- [5] 交通部第三航务工程勘察设计院.高桩码头设计与施工规范: JTJ 291—1998[S].北京: 人民交通出版社, 1998.

(本文编辑 王璁)