

转动刚度对水平力在高桩码头排架中的分配影响研究

徐凤娇, 陈廷国, 侯永为

(大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116023)

摘要: 针对水平集中力在高桩码头排架中的分配问题建立新的简化模型, 给出模型求解方法。确定水平集中力的横向分力在各排架中的分配时, 可将码头上部结构在水平方向视为一个刚性连续梁, 而排架对上部结构除了水平约束作用, 还有转动约束。由此, 提出排架转动刚度系数的概念及计算方法, 修正规范假定的计算简化模型, 并推导出水平力在高桩码头排架中的简化分配公式, 此公式对有斜桩的高桩码头同样适用。结果表明, 与规范相比, 用简化公式计算全直桩码头的水平力分配系数精度更高, 可以更好地节省材料、降低成本, 为结构设计和规范修订提供参考。

关键词: 转动刚度; 全直桩; 分配系数; 简化公式

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)01-0098-06

Influence of rotational stiffness on distribution coefficient of horizontal force in the bents of high-piled wharf

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

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: A new simplified model for the distribution coefficient of horizontal force in the bents of high-piled wharf is built and solved in this paper. When determining the distribution coefficient, the superstructure of the dock can be simplified as reinforcing beam. Bents can confine the horizontal and angular displacement. Thus, the rotational stiffness coefficient was put forward and elaborated. Then the simplified calculation model used in standard was modified and the simplified calculating formula for distribution coefficient in the bents was deduced, which was also applied to the wharf of inclined piles. The results show that the simplified formula can improve the design precision, save materials and cost comparing with the design code especially for the all-vertical-piled wharf. It offers a reference for structure design and standard revision.

Keywords: rotational stiffness; all-vertical-piled; distribution coefficient; simplified formula

我国深水岸线资源缺乏, 随着船舶大型化的发展, 离岸深水港的建设成为今后港口向深海发展的大趋势。在外海及岛岸沿线, 风、浪、流作用较大, 如果采用重力式结构, 墙前产生的立波将严重影响船舶安全靠泊作业, 此时, 建造透空式的高桩码头将是较佳的选择。而全直桩码头具

有桩力均匀、沉桩方便、能较好地适应岸坡变形、造价低等特点, 适合在外海开敞式码头中选用^[1]。全直桩结构形式在欧美、中东及日本得到广泛应用^[2]。在我国已建成的全直桩结构形式的码头, 如宁波算山原油码头、深圳赤湾9[#]~12[#]泊位、宁波协和石化原油码头等, 也取得了很好

收稿日期: 2014-05-23

作者简介: 徐凤娇(1988—), 女, 硕士研究生, 从事高桩码头结构方面的研究。

的经济效益。

在高桩码头横向排架的受力计算中, 船舶荷载 (包括系缆力、撞击力) 产生的水平集中力可能是结构设计的控制荷载。水平集中力的横向分力由力直接作用的排架及其相邻排架共同承担。根据《高桩码头设计与施工规范》^[3], 确定水平集中力的横向分力在各排架中的分配时, 可将码头上部结构在水平方向视为一个刚性连续梁, 排架简化为支撑弹簧, 按弹性支承刚性连续梁计算水平力的横向分力在各排架中的分配系数。

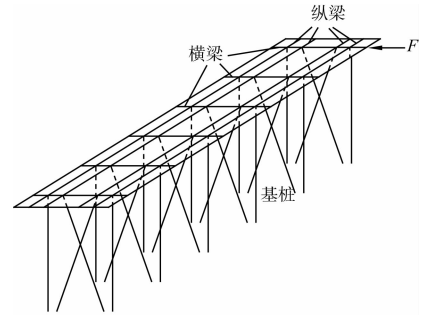
但对全直桩码头分析时, 可发现整体建模计算得到的水平力分配系数与规范相差较大。排架对上部结构除了水平约束作用, 还有转动约束。即将桩基简化成弹簧时, 弹簧除了具有水平刚度, 还有转动刚度。本文由此修正规范中的计算简化模型, 推导分配系数简化公式, 为修正规范和高桩码头设计提供依据。

1 理论推导

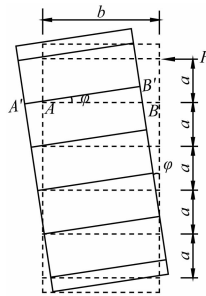
高桩梁板式码头空间结构见图 1a), 上部承台与基桩组成横向排架。假设基桩弹性模量为 E , 泊松比为 ν , 桩竖直高度为 l , 截面惯性矩为 I , 截面极惯性矩为 I_p 。码头宽度为 b , 排架间距为 a , 共有 n 榀排架, 每榀排架有 p 根桩。并假定码头每榀排架参数相同。桩竖直高度 l 可由 m 法或假想嵌固点得到。

码头受到水平集中力作用后, 不仅会整体平动, 还会发生转动, 两者叠加后的位移见图 1b) 实线所示。当码头转动角度 φ 时, 横梁也会转动相同的角度 (从 AB 到 $A'B'$)。但因为基桩上、下端固定, 而上部横梁转动, 排架发生扭转, 从而对上部结构产生抗扭作用。

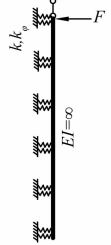
因此, 可以将码头上部结构在水平方向视为一个刚性连续梁, 桩基简化为支撑弹簧。弹簧除了约束刚性梁的水平位移, 还约束转动, 即弹簧有水平刚度 k 和转动刚度 k_φ 两个参数。计算简图见图 1c)。



a) 空间简化模型



b) 码头平面位移



c) 结构计算简图

图 1 高桩梁板式码头结构

1.1 水平刚度系数 k

弹簧的水平刚度系数 k 就是使一榀排架产生单位水平位移时需要施加的水平力。为计算简便, 只考虑排架的水平位移, 上部横梁刚度可看作是无穷大, 故 k 等于一榀排架所有桩的侧向刚度系数之和。基桩上下可以认为都是固结。

对于直桩, 单根桩的侧向刚度系数^[4]为:

$$k_0^{(1)} = \frac{12EI}{l^3} \quad (1)$$

对于斜桩, 桩的竖直高度为 l , 则桩长为 $l/\cos\alpha$, α 为斜桩与竖直线的夹角。当固端水平位移为 1 时, 垂直于桩的方向和沿着桩的方向的位移分别为 $\cos\alpha$ 和 $\sin\alpha$ 。产生的剪力 $F_Q = \frac{12EI}{l^3} \cos^4\alpha$, 轴力 $F_N = \frac{EA}{l} \cos\alpha \sin\alpha$ 。则 $F_k = F_Q \cos\alpha + F_N \sin\alpha$, 见图 2。

$$k_0^{(2)} = \frac{F_k}{1} = \frac{12EI}{l^3} \cos^5\alpha + \frac{EA}{l} \cos\alpha \sin^2\alpha \quad (2)$$

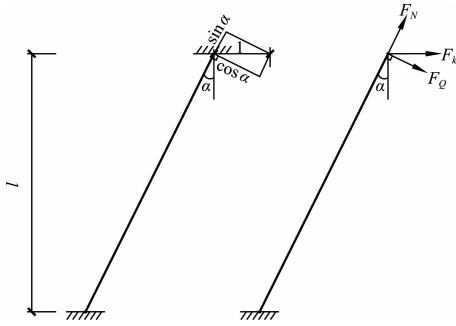


图2 斜桩侧向刚度系数计算

当 $\alpha=0$ 时, 式(2)可以化简为式(1)。所以, 弹簧的水平刚度系数为:

$$k = \sum_{t=1}^p \left(\frac{12E_t I_t}{l_t^3} \cos^5 \alpha_t + \frac{E_t A_t}{l_t} \cos \alpha_t \sin^2 \alpha_t \right) \quad (3)$$

1.2 转动刚度系数 k_φ

水平集中力的横向分力作用使码头上部结构转动角度 φ , 同时带动排架中的横梁转动相同角度 (图1)。因为横梁转动, 而基桩下端固定, 排架发生扭转。转动刚度 k_φ 表示一樁排架对转动的抵抗能力, 它在数值上等于使排架产生单位转角时需要施加的力矩。

以基桩对称分布的排架为例, 推导 k_φ 的表达式。已知码头宽度为 b , 第 t 根桩与排架中心的距离为 w_t ($t \leq p$ 且为正整数)。

对一樁排架施加力偶 M_φ , 使排架转动 $\varphi = 1$ 。第 t 根桩桩顶水平位移为 Δ_t , 扭转角度 $\varphi = 1$, 桩底固定, 因此桩对横梁作用水平剪力 F_t 和扭矩 M_e 。排架位移和受力见图3。因为排架转动角度很小, 故 $\varphi \approx \tan \varphi$ 。由图可得:

$$\Delta_t = w_t \quad (4)$$

为计算简便, 斜桩因桩顶的平面外移动而对横梁产生的水平剪力可以近似认为与直桩 (即 $\alpha = 0$) 相同, 故

$$F_t = k_{0t}^{(1)} \Delta_t \quad (5)$$

随着排架转动, 每根桩产生的扭矩^[5]为:

$$M_{et} = \frac{G_t I_{Pt}}{l_t} = \frac{E_t I_{Pt}}{2(1 + \nu_t) l_t} \quad (6)$$

由平衡方程, 可知:

$$M_\varphi = \sum_{t=1}^p (F_t w_t + M_{et}) \quad (7)$$

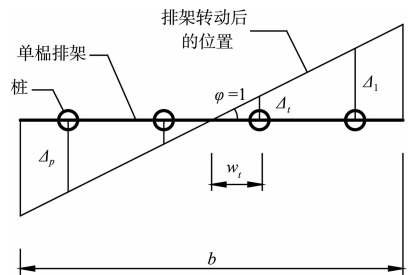
将式(4) ~ (6)代入式(7)中, 可以化简得到:

$$M_\varphi = \sum_{t=1}^p \left[k_{0t}^{(1)} w_t^2 + \frac{E_t I_{Pt}}{2(1 + \nu_t) l_t} \right] \quad (8)$$

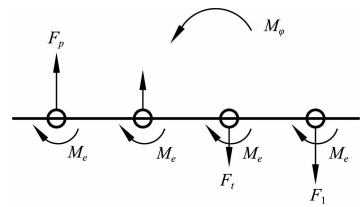
故弹簧转动刚度为:

$$k_\varphi = \frac{M_\varphi}{\varphi} = \sum_{t=1}^p \left[k_{0t}^{(1)} w_t^2 + \frac{E_t I_{Pt}}{2(1 + \nu_t) l_t} \right] \quad (9)$$

当基桩布置非对称时, 仍可通过位移的几何关系和力的平衡方程推导出 k_φ , 在此不再赘述。



a) 排架位移



b) 横梁受力

图3 排架的位移和受力

1.3 分配系数

结构计算简图及位移见图4, $F=1$ 的单位力作用在 j 排架上, 最终位移可以看做是结构先平移 δ , 然后转动角度 φ 。刚性连续梁的总长为 $(n-1)a$, 由几何关系可得, 第 i 樁排架的位移为:

$$\delta_i = \delta + \left(\frac{n+1}{2} - i \right) a \varphi \quad (10)$$

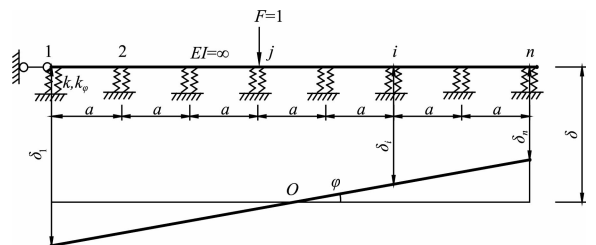


图4 计算简图

水平集中力在每榀排架中的分配系数, 即弹簧的竖向反力:

$$F_i = k\delta_i \quad (11)$$

反力对中心 O 点的力臂大小为:

$$a_i = \left| \frac{n+1}{2} - i \right| a \quad (12)$$

由平衡条件得

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1 \quad (13)$$

$$\sum M_o = 0 \quad (14)$$

式(13)即 $\sum_{i=1}^n k\delta_i = k \sum_{i=1}^n \delta_i = nk\delta = 1$, 解得

$$\delta = \frac{1}{nk} \quad (15)$$

式(14)即

$$\sum_{i=1}^n F_i a_i + nk_\varphi \varphi - \left(\frac{n+1}{2} - j \right) a = 0 \quad (16)$$

由式(10) ~ (12)可得:

$$\sum_{i=1}^n F_i a_i = k \sum_{i=1}^n \delta_i a_i = k \sum_{i=1}^n \left[\delta + \left(\frac{n+1}{2} - i \right) a \varphi \right] \left(\frac{n+1}{2} - i \right) a = \quad (17)$$

$$k \sum_{i=1}^n \left(\frac{n+1}{2} - i \right)^2 a^2 \varphi = \frac{n(n^2 - 1)}{12} ka^2 \varphi$$

将式(17)代入式(16)可得:

$$\left[\frac{n(n^2 - 1)}{12} ka^2 + nk_\varphi \right] \varphi = \left(\frac{n+1}{2} - j \right) a \quad (18)$$

故

$$\varphi = \frac{6(n+1-2j)a}{n(n^2-1)ka^2 + 12nk_\varphi} \quad (19)$$

将式(15)、(19)代回式(11), 可得水平集中力在第 i 榀排架的分配系数为:

$$F_i = \frac{1}{n} + \frac{3(n+1-2i)(n+1-2j)a^2}{n(n^2-1)a^2 + 12nk_\varphi/k} \quad (20)$$

式中: k 为榀排架的水平刚度系数(N/m); k_φ 为 1 榀排架的转动刚度系数(N·m); a 为排架间距(m); n 为码头结构段内排架数目; j 为受力排架编号。

若不考虑排架的转动约束作用, 即当 $k_\varphi/k \approx 0$

时, $F_i \approx \frac{1}{n} + \frac{3(n+1-2i)(n+1-2j)}{n(n^2-1)}$, 等同于规范。

2 算例

2.1 全直桩码头

以南方某万吨级油品码头为依托工程。工程采用高桩梁板式结构, 靠船平台平面尺度(长×宽)为 70 m×28 m, 码头前沿水深 -12.70 m, 顶面高程 6.00 m, 排架间距为 11 m。每榀排架采用 4 根 $\phi 1\ 800$ mm 嵌岩桩, 桩基嵌入中风化岩。上部结构均采用现浇横梁, 预制预应力纵梁, 面层采用叠合板形式将上部结构连成整体。码头断面见图 5。

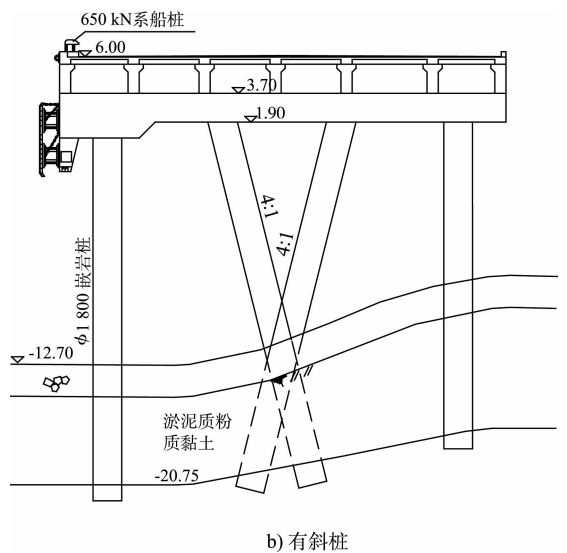
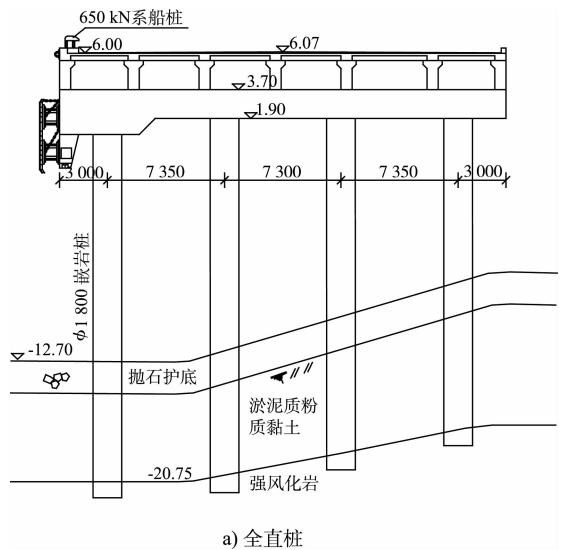


图 5 码头断面

基桩中灌注 C35 现浇混凝土, 弹性模量、泊松比和密度分别取 3.15×10^4 MPa、0.20 和 2.5 t/m^3 。纵横梁和面板均为 C45 钢筋混凝土结构, 弹性模

量、泊松比和密度分别取 3.35×10^4 MPa, 0.20 和 2.5 t/m^3 。桩基嵌岩深度 7 m, 取嵌岩深度 5.75 m 为假想完全固结^[6]。为计算方便, 取桩长相同都为 28.4 m。

将水平集中力分别作用在第 1~4 榀排架, 用以下 3 种方法计算各排架中的分配系数。

1) 规范计算。

《高桩码头设计与施工规范》^[3] 规定, 当码头排架间距相等且支撑点水平刚度系数相等时, 水平集中力在排架中的分配系数可按附录 A 确定。

2) 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, 码头桩基选择 beam188 梁单元模拟^[7]。将水平集中力分别作用在不同排

架上, 计算每榀排架桩嵌固点的支座反力之和与施加的水平力的除数, 获得各横向排架的水平力分配系数^[8]。

3) 本文公式计算。

基桩 $E=3.15 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\nu=0.20$, 直径 $D=1.8$ m, $l=28.4$ m。两根外侧桩距中心 $w_1=11$ m, 内侧桩距中心 $w_2=3.65$ m。排架间距 $a=11$ m, 共有 $n=7$ 榀排架。 $k_0 = \frac{12EI}{l^3} = 8.503 \times 10^6 \text{ N/m}$; $k = pk_0 = 3.401 \times 10^7 \text{ N/m}$; $k_\varphi = \frac{M_\varphi}{\varphi} = 4.190 \times 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

将水平集中力分别作用在排架 1~4 ($j=1, 2, 3, 4$) 上, 用式(20)计算分配系数。

将以上 3 种方法计算得到的分配系数汇总于表 1。

表 1 3 种方法计算得到的全直桩码头分配系数

方法	受力排架	各排架分配系数						
		1	2	3	4	5	6	7
规范	1	0.465	0.357	0.250	0.143	0.034	-0.071	-0.178
	2	0.357	0.286	0.214	0.143	0.071	0.000	-0.071
	3	0.250	0.214	0.179	0.143	0.107	0.071	0.036
	4	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
ANSYS 建模	1	0.395	0.310	0.225	0.142	0.059	-0.024	-0.107
	2	0.310	0.254	0.198	0.143	0.087	0.032	-0.024
	3	0.224	0.198	0.171	0.144	0.116	0.088	0.060
	4	0.140	0.141	0.143	0.144	0.144	0.144	0.144
本文公式	1	0.399	0.314	0.228	0.143	0.057	-0.028	-0.113
	2	0.314	0.257	0.200	0.143	0.086	0.029	-0.028
	3	0.228	0.200	0.171	0.143	0.114	0.086	0.057
	4	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143

由表 1 可以看出, 规范与 ANSYS 整体建模计算得到的结果相差较大, 本文公式与 ANSYS 建模结果更加接近。当受力排架为排架 1 即水平力作用在端部排架时, 排架 1 为最不利排架。由表 1 可以看出, 按照规范、ANSYS 整体建模和本文公式 3 种方法, 得到的最不利排架分配系数分别为 0.465、0.395、0.399。

规范与 ANSYS 建模结果的误差是 $(0.465 - 0.395)/0.395 = 17.72\%$, 规范计算值偏大。因此应该对规范进行修正, 以提高计算精度, 减少材料浪费, 降低工程成本。

本文公式与 ANSYS 整体建模计算结果比较,

相对误差为 $(0.399 - 0.395)/0.395 = 1.01\%$, 极大地提高了计算精度; 与规范给出的数值相比, 相对误差为 $(0.465 - 0.399)/0.399 = 16.54\%$, 如果以此作为船舶系缆力和撞击力等水平力分配的计算依据, 将极大地节省材料。

2.2 有斜桩码头

将 2.1 中算例的中间两根直桩变为斜桩 ($\tan\alpha = 1/4$), 其他参数不变 (图 5), 以方便 2 个算例对比。将水平集中力分别作用在第 1~4 榀排架, 用规范、ANSYS 整体建模和本文公式 (计算步骤同 2.1) 3 种方法分别计算排架中的分配系数, 结果见表 2。

表 2 3 种方法计算得到的有斜桩码头分配系数

方法	受力排架	各排架分配系数						
		1	2	3	4	5	6	7
规范	1	0.465	0.357	0.250	0.143	0.034	-0.071	-0.178
	2	0.357	0.286	0.214	0.143	0.071	0.000	-0.071
	3	0.250	0.214	0.179	0.143	0.107	0.071	0.036
	4	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143
ANSYS 建模	1	0.470	0.345	0.235	0.132	0.034	-0.060	-0.156
	2	0.344	0.288	0.211	0.140	0.072	0.006	-0.061
	3	0.232	0.209	0.192	0.149	0.110	0.073	0.035
	4	0.128	0.138	0.148	0.162	0.150	0.141	0.134
本文公式	1	0.457	0.352	0.247	0.143	0.038	-0.066	-0.171
	2	0.352	0.282	0.213	0.143	0.073	0.003	-0.066
	3	0.247	0.213	0.178	0.143	0.108	0.073	0.038
	4	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143	0.143

由表 2 可以看出, 3 种方法计算得到的分配系数相差不大。用规范、ANSYS 建模和本文公式得到的最不利分配系数分别为 0.465、0.470 和 0.457。

本文公式与 ANSYS 整体建模计算结果比较, $(0.457 - 0.470) / 0.470 = -2.77\%$, 在可接受的误差范围内。故简化公式对全直桩和有斜桩的高桩码头都适用, 可以代替规范使用。

规范与 ANSYS 建模结果比较, 相对误差为 $(0.465 - 0.470) / 0.470 = -1.06\%$, 所以规范对于有斜桩码头是适用的。但随着码头结构形式的变化, 规范有其局限性, 所以应该予以修正。

3 结论

1) 排架对码头上部结构起到水平约束和转动约束的作用。确定水平集中力的横向分力在高桩码头各排架中的分配时, 可将码头上部结构在水平方向视为一个刚性连续梁, 而排架简化为具有水平刚度和转动刚度的弹簧。排架的水平刚度等于一榀排架所有桩的侧向刚度系数之和, 排架的转动刚度可以通过本文简化公式或单榀排架受力平衡得到。

2) 对于有斜桩的高桩码头, 排架转动刚度影响较小。但对于全直桩码头, 排架的转动刚度对水平力分配的影响不可忽略; 与规范相比, 使用

本文推导的理论公式精度更高, 也更节约材料、节省工程造价。

3) 本文推导出的理论公式适用于所有梁板式高桩码头, 简化公式计算结果与 ANSYS 数值模拟整体结果相比误差在 3% 以内, 可代替规范使用。

参考文献:

- [1] 张志明, 白景涛. 全直桩码头分段伸缩缝(沉降缝)构造的特殊处理方法及其传递水平力的分析[J]. 水运工程, 2002(3): 25-29.
- [2] 张志明, 胡家顺. 我国大型开敞式码头结构设计与施工技术现状及发展趋势探讨[C]//港口工程分会技术论文集. 北京: 中国土木工程学会港口工程分会, 2005.
- [3] JTS 167-1—2010 高桩码头设计与施工规范[S].
- [4] 龙驭球, 包世华. 结构力学 I [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [5] 孙训方, 方孝淑, 关来泰. 材料力学 (I) [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [6] JTJ 285—2000 港口工程嵌岩桩设计与施工规程[S].
- [7] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [8] 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.