



码头设计中桩基有效计算长度分析

王安华，杨国平

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：有效计算长度是高桩码头桩基压屈验算的控制性参数。国内外规范提供了其理想约束下的计算方法，但不能完全反映顶部实际约束，也未明确整体分析时顶部约束类型。介绍利用有限元屈曲临界荷载确定桩基有效计算长度的方法，该方法反映实际约束较为精确，并提出码头桩基局部分析和整体分析的设计理念，得出相应规律。结果表明，局部桩基分析时，端部排架1~3顶部可认为铰接，其他排架顶部可认为固接；码头结构整体分析时，桩基顶部约束为平滑约束；码头结构整体分析时，排架 ≥ 2 轴时桩基顶部可认为平滑约束；单排桩 ≥ 2 根时顶部横向可认为平滑约束。实际码头工程中桩基布置、斜率等变化因素较多，可利用本文方法进行分析。

关键词：桩基有效计算长度；高桩码头；顶部边界约束；有限元屈曲临界荷载；桩基局部分析；整体分析

中图分类号：U 656.1+13

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)10-0168-05

Analysis of effective calculation length for pile in jetty design

WANG An-hua, YANG Guo-ping

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

Abstract: The effective length of pile foundation is the main control parameter when checking the buckling capacity of pile for high pile beam jetty. The effective length calculation method of pile under ideal constraints is provided in Chinese and foreign codes, but it cannot fully reflect the actual constraints on jetty top, and the boundary type of wharf integral pile foundation analysis is not defined. We introduce the method to calculate pile effective length using buckling critical load by finite element method, which can reflect the accurate actual constraints. We propose the design idea of partial analysis and integral analysis of wharf pile, and obtain the corresponding law. The results show that for pile partial analysis, the top boundary of end pile bent 1~3 can be considered as articulated, and that of the other racks can be considered as fixed. For the integral analysis of wharf structure, the top boundary of the integral pile foundation is a smooth constraint. For the integral analysis of wharf structure, the top boundary of the overall pile foundation can be considered as smooth constraint when pile bent are all more than 2. The top transverse boundary can be considered as smooth constraint when single pile bent is with more than 2 piles. The pile arrangement, raking slope and so on are varietal in actual engineering. This method can be used for specific analysis.

Keywords: effective calculation length of pile; high pile beam jetty; top boundary constraint; finite element critical buckling load; partial analysis of pile; integral analysis

高桩码头结构中桩基是重要的抗压弯构件，深水区桩基有效计算长度的确定将直接影响桩基的受压稳定系数和压屈承载力验算，进而影响桩基直径与壁厚。目前国内规范通用做法为^[1-2]：

$$L_{\text{eff}} = \mu L \quad (1)$$

式中： L_{eff} 为压杆有效计算长度； L 为构件基准长度(根据泥面以上长度、地质情况和入土长度确定)； μ 为有效计算长度系数(根据边界类型

确定)。

国内外相关规范均给出了理想约束条件下的有效计算长度系数^[3], 但码头桩基实际顶部和底部边界约束与理想约束不完全相同, 理想约束也不能完全反映码头顶部实际约束, 同时规范也未明确码头整体桩基结构分析时顶部的边界类型。

国内相关论文经过理论推导, 得出有效计算长度系数与桩数间理论公式^[4], 但其研究偏于理论, 未考虑顶部板梁空间刚度等影响因素, 尚未达到工程应用的程度。

本文结合材料力学理论及欧标相关规定, 研究采用有限元屈曲临界荷载方法确定具体工程桩基有效计算长度的方法, 并用理论边界模型对该方法进行验证, 以实际工程为依托变化相关参数

进行分析, 总结出全直桩码头不同位置桩基顶部约束类型的分布规律。

1 国内外规范对桩基有效计算长度的规定

《建筑桩基技术规范》《码头结构设计规范》以及 Eurocode 2: *Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings* 针对理想约束提供了有效计算长度系数 μ : 两端铰接时 $\mu=1.0$; 一端固接一端自由时 $\mu=2.0$; 一端固接一端铰接时 $\mu=0.7$; 两端固接时 $\mu=0.5$; 一端固结一端滑移时 $\mu=1.0$ 。

《建筑桩基技术规范》针对桩基顶部铰接和固接的有效计算长度做出规定, 《码头结构设计规范》附录 C 根据码头结构特点增加了桩顶滑移约束, 两规范关于有效长度的计算方法见表 1。

表 1 规范关于桩基有效长度的计算方法

约束	工况	桩基有效长度计算方法	
		$h < 4T$	$h \geq 4T$
桩顶铰接	桩尖未嵌岩石	$L_{\text{eff}} = l_0 + h$	$L_{\text{eff}} = 0.7(l_0 + 4T)$
	桩尖嵌岩(按固接处理)	$L_{\text{eff}} = l_0 + h$	$L_{\text{eff}} = 0.7(l_0 + 4T)$
桩顶固接	桩尖未嵌岩石(按铰接处理)	$L_{\text{eff}} = 0.7(l_0 + h)$	$L_{\text{eff}} = 0.5(l_0 + 4T)$
	桩尖嵌岩(按固接处理)	$L_{\text{eff}} = 0.5(l_0 + h)$	$L_{\text{eff}} = 0.5(l_0 + 4T)$
桩顶滑移	桩尖未嵌岩石(按铰接处理)	$L_{\text{eff}} = 2.0(l_0 + h)$	$L_{\text{eff}} = l_0 + 4T$
	桩尖嵌岩(按固接处理)	$L_{\text{eff}} = l_0 + h$	$L_{\text{eff}} = l_0 + 4T$

注: T 为桩的相对刚度特征值; l_0 为泥面以上桩基长度; h 为桩的入土长度。

Eurocode 2: *Design of concrete structures-Part 1-1: General rules and rules for buildings* 提供了理想约束下桩基有效计算长度的确定方法: 两端铰接时 $L_{\text{eff}} = L$ (L 为构件基准长度); 一端固接一端自由时 $L_{\text{eff}} = 2L$; 一端固接一端铰接时 $L_{\text{eff}} = 0.7L$; 两端固接时 $L_{\text{eff}} = 0.5L$; 一端固结一端滑移时 $L_{\text{eff}} = L$ 。

2 关于桩基屈曲临界压力分析及有效计算长度有限元确定方法

参照《材料力学》^[5] 及 Eurocode 2 中的相应说明, 桩基的压杆弹性临界压力欧拉公式为:

$$N_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu L)^2} = \frac{\pi^2 EI}{L_{\text{eff}}^2} \quad (2)$$

式中: N_{cr} 为桩基的弹性临界压力, 对应有限元分

析中的屈曲临界荷载; EI 为抗弯刚度; L 为构件基准长度; μ 为有效计算长度系数; L_{eff} 为压杆有效计算长度。

由欧拉公式转换得到有效计算长度的确定公式:

$$L_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{\pi^2 EI}{N_{\text{cr}}}} \quad (3)$$

根据 Eurocode 2 中条文说明, N_{cr} 可利用考虑具体边界约束的有限元屈曲临界荷载分析出构件的屈曲荷载(即弹性临界压力)而得到, 具体分析时 N_{cr} 为加载荷载 P 与临界荷载系数 K 之积。此方法可利用有限元计算模型充分考虑桩基顶部梁、板、支座、位移等实际边界约束, 采用各种土弹簧模型模拟桩基底部约束, 以此解决码头桩基结构顶

部约束不清晰的问题。

采用上述方法,以单桩有限元模型针对5种理论模型进行验证,以验证此方法的准确性,其中桩基直径 $D=1.2\text{ m}$ (计算壁厚16 mm),计算结果见表2。

表2 有限元分析理论模型的有效计算长度系数

约束模型	基准长度/m	K	μ
两端铰接	42	3.07	1.00
	36	4.14	1.00
	30	6.02	1.00
	24	9.24	1.01
	20	13.21	1.01
一端固接 一端自由	42	0.77	1.98
	36	1.04	1.98
	30	1.50	1.98
	24	2.34	1.98
	20	3.36	1.99
一端固接 一端铰接	42	6.20	0.70
	36	8.40	0.70
	30	12.02	0.70
	24	18.55	0.70
	20	27.00	0.70
两端固接	42	12.03	0.50
	36	16.26	0.50
	30	23.15	0.50
	24	37.13	0.50
	20	50.51	0.51
一端固接 一端滑移	42	3.05	0.99
	36	4.14	0.99
	30	5.95	1.00
	24	9.24	1.00
	20	13.22	1.00

由表2可看出,采用本文方法分析得到的5种理论边界有效计算长度系数 μ 与理论值相差都在1%以内,可满足工程设计的需求。在计算中发现单元长度为 $5D$ 时,精度可达到1%,因此建议单元最小长度为 $5D$ 。

3 局部桩基分析和整体桩基分析的区别

按照规范确定的桩基有效计算长度是单个桩基构件在外部理想约束下的有效计算长度。从码头整体结构角度,单个桩基外部边界约束条件介于理想边界约束之间,有时也难以界定周围梁板

或桩能否对桩基形成理想边界约束。

码头整体桩基同时受力时的边界约束类型难以从理论模型中推导,或难以反映整个结构段桩基整体协调受力情况。现行设计方法一般默认:所有桩基单个构件有一定安全富余度时,整个结构段的桩基安全。多个桩基构件同时处于临界状态时,能否相互提供有效侧向支撑约束,理论方法较难分析或分析过于繁琐。

本文从实际设计应用的角度,针对不同分析对象和目的引入局部桩基分析和整体桩基分析的设计理念。局部桩基分析:以局部桩基的屈曲加载荷载为变量,其他桩基的荷载作为常量,然后屈曲分析得到局部桩基的屈曲荷载、有效计算长度和有效计算长度系数。整体桩基分析:以整体桩基荷载为变量进行屈曲分析得到所有桩基的屈曲荷载、有效计算长度和有效计算长度系数。

局部桩基分析应用领域:码头局部桩基荷载较大而其他桩基轴力富余度较大或变化幅度较小,分析局部控制桩基在整体结构中的压曲稳定承载力。整体桩基分析应用领域:桩基结构在码头整体结构的压曲稳定验算。

4 案例分析

以非洲某矿石码头工程为例,码头宽度为20 m,由于作业水位和施工要求采用全直桩+现浇纵横梁结构,排架间距为6 m,单个结构段11个排架,单个排架横向4根直径1.2 m(计算壁厚16 mm)的钢管桩,横梁尺寸 $2.0\text{ m}\times2.2\text{ m}$ (高×宽),轨道梁尺寸 $2.0\text{ m}\times1.2\text{ m}$,面板为0.4 m厚预制板+0.2 m厚现浇层。地质表层土为粉质黏土,依据地质勘察报告和《码头结构设计规范》,土的水平抗力系数 m 取 4.5 MN/m^4 ,桩的相对刚度特征值 T 为3 m。桩基界面刚度为 $2.15\text{ GN}\cdot\text{m}^2$;横梁截面刚度为 $47.7\text{ GN}\cdot\text{m}^2$,线刚度为 $9.53\text{ GN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$;纵梁截面刚度为 $26\text{ GN}\cdot\text{m}^2$,线刚度为 $4.33\text{ GN}\cdot\text{m}^2/\text{m}$ 。码头断面和计算模型见图1、2。

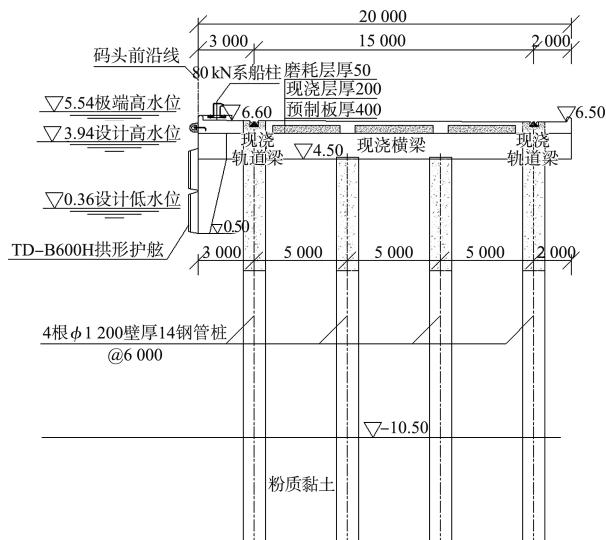


图 1 码头断面 (尺寸: mm; 高程: m)

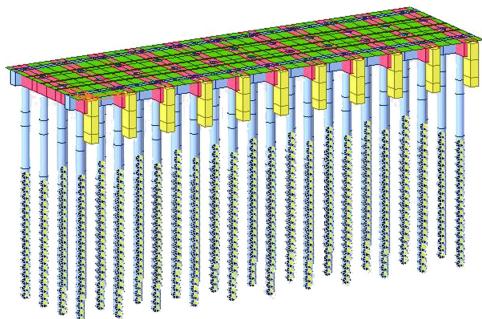


图 2 码头整体计算模型

采用有限元屈曲临界荷载法分析桩基有效计算长度及其系数, 变换泥面上桩基悬臂长度、变量加载位置、结构段排架数和单排架桩数, 并总结规律, 共分 5 种情况: 1) 整体结构段中单个排架桩基加载变量而其他排架桩基不加载时, 局部桩基有效计算长度系数 μ_1 ; 2) 整体结构段中单个排架桩基局部加载变量而其他排架桩基加载常量时, 局部桩基有效计算长度系数 μ_2 ; 3) 装船机加载 5 个排架而其他排架加载常量时, 局部桩基有效计算长度系数 μ_3 ; 4) 结构段整体加载时, 整体桩基有效计算长度系数 μ_4 ; 5) 结构段不同排架数整体加载时, 整体桩基有效计算长度系数 μ_5 。 $\mu_1 \sim \mu_4$ 计算值见表 3, μ_5 计算值见表 4。

表 3 $\mu_1 \sim \mu_4$ 计算值

计算值	加载排架位置	泥面以上桩基悬臂长度/m				
		14	18	24	30	36
μ_1	排架 1	0.61	0.60	0.60	0.60	0.61
	排架 2	0.65	0.65	0.67	0.68	0.69
	排架 3	0.56	0.57	0.58	0.59	0.60
	排架 4	0.51	0.51	0.51	0.51	0.52
	排架 5	0.51	0.51	0.5	0.49	0.48
	排架 6	0.51	0.51	0.5	0.49	0.48
μ_2	排架 1	0.62	0.63	0.65	0.68	0.72
	排架 2	0.67	0.68	0.72	0.75	0.79
	排架 3	0.58	0.60	0.63	0.67	0.72
	排架 4	0.52	0.52	0.56	0.59	0.64
	排架 5	0.51	0.51	0.50	0.54	0.58
	排架 6	0.51	0.51	0.50	0.51	0.56
μ_3	装船机加载 1~5 排架桩基	0.94	0.94	0.94	0.95	0.95
	整体桩基加载	0.99	0.99	0.99	0.98	0.98

注: 排架为 11 轴, 单排 4 根桩。

表 4 μ_5 计算值

单结构段 排架数/轴	单排桩 数/根	泥面以上 纵向有效计算 长度系数		
		横向有效计算 长度系数	纵向有效计算 长度系数	横向有效计算 长度系数
8	4	36	0.98	0.98
6	4	36	0.98	0.98
5	4	36	0.98	0.98
4	4	36	0.99	0.98
3	4	36	0.99	0.98
2	4	36	1.01	0.98
1	4	36	1.96	0.98
2	4	24	1.01	0.98
1	4	24	1.95	0.99
3	3	36	0.99	0.98
2	3	36	1.01	0.98
1	3	36	1.96	0.98
3	3	24	0.99	0.98
2	3	24	1.01	0.98
1	3	24	1.95	0.99
1	2	24	1.95	0.99

由表 3 可看出, 考虑其他排架桩基受力为常量时有效计算长度系数 μ_2 大于不考虑其他桩基排架受力时有效计算长度系数 μ_1 , μ_2/μ_1 为 1.0~1.2。码头结构中各个桩基应为同时受力, 并在某种荷载组合状态下局部桩基受力较大而作为控制桩基。

构件,因此分析控制桩基构件在整体结构中的压曲稳定时应考虑其他桩基的受力情况。以表 3 的 μ_2 为分析对象,端部排架 1~3,泥面以上的桩基悬臂长度 $\leq 8T$ 时,局部桩基有效计算长度系数为 0.58~0.72,顶部约束介于固接与铰接之间,基本为铰接;泥面以上的桩基悬臂长度 $>8T$ 时,局部桩基有效计算长度系数为 0.67~0.79,顶部约束介于铰接与平滑之间。中部排架 4~6,泥面以上的桩基长度 $\leq 8T$ 时,局部桩基有效长度系数为 0.50~0.56,桩基顶部约束为固接与铰接之间,基本为固接;泥面以上的桩基长度 $>8T$ 时,局部桩基有效长度系数 0.51~0.64,桩基顶部约束介于固接与铰接之间。综上,对于码头泥面以上桩基长度 $\leq 8T$ 时局部桩基进行分析,端部排架 1~3 可认为是顶部铰接约束,排架 3 以内其他排架可认为是固接约束。

由表 3 中的 μ_3 和 μ_4 可看出,对于装船机加载至多排架上和整体桩基加载时的桩基有效计算长度系数基本相同。对于码头结构整体加载时,有效计算长度系数为 0.98~0.99,可认为码头桩基整体分析时,顶部约束为平滑约束。

由表 4 可看出,对于排架 ≥ 2 轴并横向桩数 ≥ 2 根,码头桩基整体分析时,顶部约束为平滑约束。对于单排桩的情况,码头桩基整体分析时,顶部纵向约束可认为是自由约束,横向桩数 ≥ 2 根时,顶部横向约束可认为是平滑约束。

5 结论

1) 利用有限元屈曲临界荷载方法可准确确定桩基有效计算长度,能实际反映上部结构和桩底的边界约束,进而使结构验算更能反映出结构实际受力状态。本方法借助有限元软件分析,适用

(上接第 160 页)

- [3] 远航,任志杰,王保华,等.外海钢管斜桩嵌岩混凝土芯柱成孔技术[J].水运工程,2020(9):191-195.
- [4] 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

于各种桩基结构形式和边界约束,使用范围广。

2)有限元屈曲临界荷载方法和经典理论边界模式进行对比,计算结果与经典理论模型一致,验证了该方法的正确性。

3)在桩基承载力验算中,整体结构中分析局部桩基承载力时可采用局部桩基分析方法,整体桩基承载力可采用整体桩基分析方法。

4)利用本文方法对某全直桩码头分析得到如下规律:①码头局部桩基有效计算长度系数分析时,应考虑其他桩基同时受力,桩基悬臂长度 $\leq 8T$ 时,端部排架 1~3 桩基顶部边界可认为是铰接约束,排架 3 以内其他排架桩基边界可认为是固接约束;②码头结构整体分析时,整体桩基顶部约束为平滑约束;③码头整体桩基分析时,排架 ≥ 2 轴且横向桩数 ≥ 2 根,顶部边界可认为是平滑约束;单排桩顶部纵向边界可认为是自由约束,横向桩数 ≥ 2 根时顶部横向边界可认为是平滑约束。

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.
- [3] British Standards Institution.Eurocode 2: design of concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings[S].London: BSI , 2004.
- [4] 李存兴.水运工程桩基压屈稳定计算长度系数探讨[J].水运工程,2019(12):127-132,163.
- [5] 单辉祖.材料力学[M].北京:高等教育出版社,1999.

(本文编辑 王璁)

民交通出版社股份有限公司,2018.

- [5] 中交水运规划设计院有限公司.水运工程混凝土结构设计规范:JTS 151—2011[S].北京:人民交通出版社,2011.

(本文编辑 武亚庆)