



罗泾码头改造项目桩基压曲稳定研究

王政川, 李世强

(辽宁筑港交通工程技术研究有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要: 受压杆件在压曲失稳后将丧失继续承受原设计荷载的能力, 可能造成结构坍塌等严重后果, 在结构设计过程中要尽量避免。根据以往高桩码头设计经验, 由于码头吨位有限, 桩基的计算长度相对较小, 长细比不大, 桩基的压曲稳定一般能够满足要求。设计过程中往往更重视由地基土层控制的桩基承载力, 忽视了由桩基压曲稳定控制的桩基承载力。随着近年来船舶大型化发展、码头吨位逐年增大, 与以往工程相比, 高桩码头桩基泥面以上长度发生了较大变化, 压曲稳定有可能成为桩基承载力的控制因素。针对上述问题, 以上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程为例, 进行高桩码头桩基压曲稳定研究, 分析不同尺度桩基的受力性能及特点, 得出大尺度桩基的压曲稳定对桩长的变化敏感性较差, 更适用于大型码头的结论。研究成果可为码头结构设计时桩型选取提供参考。

关键词: 高桩码头; 桩基; 压曲稳定

中图分类号: U656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)S1-0119-05

Research on buckling stability of pile foundation in Luojing terminal renovation project

WANG Zhengchuan, LI Shiqiang

(Liaoning Port Design Institute for Transportation Engineering Technology Co., Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: After the buckling instability of a compressed member, it will lose the ability to bear the original designed load, which may lead to serious consequences such as structural collapse. Therefore, it should be avoided as much as possible in the structural design process. Based on the previous design experience of high-pile wharves, due to the limited tonnage of the wharf, the calculated length of the pile foundation is relatively small, and the slenderness ratio is not large. Generally, the buckling stability of the pile foundation can meet the requirements. During the design process, more attention is often paid to the bearing capacity of the pile foundation controlled by the soil layer of the foundation, while the bearing capacity of the pile foundation controlled by the buckling stability is ignored. With the development of large-scale ships in recent years and the increasing tonnage of wharves, compared with previous projects, the length of the pile foundation above the mud surface of high-pile wharves has changed significantly, and buckling stability may become a controlling factor for the bearing capacity of the pile foundation. In response to the above problems, taking phase I container terminal renovation project in Luojing port area of Shanghai Port as an example, the buckling stability of the pile foundation of high-pile wharves is studied, and the force performance and characteristics of pile foundation of different scales are analyzed. The conclusion is drawn that the buckling stability of large-scale pile foundations is less sensitive to changes in pile length and is more suitable for large wharves. The research results can provide a reference for the selection of pile types in wharf structure design.

Keywords: high-pile wharf; pile foundation; buckling stability

受压杆件的截面尺寸通常大于仅按强度计算出的截面, 这是由于杆件不可避免地存在初曲率、作用的外力合力作用线不可能完全与杆件的轴线

重合、且材料自身也存在不均匀性。这些因素使杆件在外力作用下除发生轴向压缩变形外, 还会产生附加的弯曲变形, 其可能随着压力的增大而

收稿日期: 2025-05-15

作者简介: 王政川(1980—), 男, 工程师, 从事港口、航道规划设计工作。

迅速发展乃至成为主要变形, 受压杆件可能突然弯曲而破坏, 即发生压曲失稳^[1-3]。受压杆件失稳后将丧失继续承受原设计荷载的能力, 而失稳现象又往往是突然发生的, 因此受压杆件失稳常造成严重的后果, 甚至导致整个结构的倒塌, 所以在结构设计中应尽量避免压曲失稳的发生^[4]。

1 规范总体要求

现行水运工程规范体系中, 桩的承载能力极限状态设计内容包括桩的压曲稳定验算, 且为强制性条文。JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[5]中第 4.1.2 条规定了桩的承载能力极限状态设计应包括的内容, 其中第 3 条为“桩的自由长度较大时, 桩的压曲稳定验算等”。JTS 147-7—2022《水运工程桩基设计规范》^[6]中第 3.1.3 条规定了桩的承载能力极限状态设计应包括的内容, 其中第 4 条为“桩身的压曲稳定验算等”。根据以往的水运工程经验, 多数情况下桩的压屈稳定性能够满足要求, 但当泥面以上桩长较大或泥面以下较大深度范围内存在软弱土层或存在可液化土层时, 桩的压屈稳定性可能成为影响桩基承载力的控制因素, 此种情况应引起重视^[7-8]。

关于压曲稳定的计算, 现行规范相对于 1998 年版《港口工程混凝土结构设计规范》^[9]的变化主要体现在两方面, 一是计算长度 l_c 增大了 $1.26T \sim 1.56T$ (T 为桩的相对刚度系数), 为定值; 二是 1998 年版规范计算时没有考虑附加偏心距 e_a , 现行规范的偏心距较 98 版规范增加了 ηe_a 。这些变化可使桩基偏心受压承载力在同等条件下降低约 20%。对于改造类项目, 由于旧结构往往建设年代久远, 应该更加重视桩基的压曲稳定。

2 偏心受压构件附加弯矩

偏心受压构件在受压过程中产生的附加弯矩主要体现为偏心距的增加。一是因荷载位置的不确定性、混凝土质量的不均匀性以及施工偏差等因素产生的附加偏心距, 根据 JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》^[10]中第 5.3.3 条, e_a

值应取 20 mm 和偏心方向截面最大尺寸的 1/30 两者中的较大值。初始偏心距 $e_i = e_0 + e_a$, $e_0 = M/N$ (M 为弯矩设计值, N 为轴力设计值)。二是为考虑结构侧移和构件挠曲引起的附加内力, JTS 151—2011《水运工程混凝土结构设计规范》第 5.3.9、5.3.10 条, 近似考虑二阶弯矩对轴向压力偏心距的影响, 将轴向压力对截面重心的初始偏心距 e_i 乘以偏心距增大系数 η , 相关计算公式为:

$$\eta = 1 + \frac{h_0}{1400e_i} \left(\frac{l_0}{h} \right)^2 \zeta_1 \zeta_2 \quad (1)$$

$$\zeta_1 = \frac{0.5f_c A}{N} \quad (2)$$

$$\zeta_2 = 1.15 - 0.01 \frac{l_0}{h} \quad (3)$$

式中: l_0 为构件的计算长度; h 为截面高度, 对于 PHC 桩取外径; h_0 为截面有效高度; ζ_1 为截面曲率修正系数, 当 $\zeta_1 > 1$ 时取 1; A 为构件的截面面积; ζ_2 为构件长细比 l_0/h 对截面曲率的影响系数, 当 $l_0/h < 15$ 时, ζ_2 取 1; N 为轴力设计值; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值。

可以看出, 当其他条件不变时, η 随着构件计算长度的增加而显著增大。通过换算, 偏心受压构件考虑附加弯矩后的弯矩设计值为 $\eta N(e_a + M/N)$ 。

3 罗泾项目桩基压曲稳定研究

JTS 167—2018《码头结构设计规范》中第 4.3.5 条规定, “在验算桩的压曲稳定和正截面承载力时, 桩的计算长度可按附录 C 确定”。按照附录 C, 对于桩顶、桩底固接的桩基, 正截面承载力计算长度 l_c 为:

$$l_c = 0.5(l + 4T) \quad (4)$$

式中: l 为桩帽底至泥面之间的距离。

随着近年来船舶大型化发展、码头吨位逐年增大, 高桩码头前沿底高程也逐步加深, 造成 l 值增大, 从而影响压曲稳定计算长度, 进而影响桩基压曲稳定。

以上海港罗泾港区集装箱码头改造一期工程为例, 分析不同尺度桩基的压曲稳定。罗泾港区设计高水位为 4.14 m, 设计低水位为 0.76 m

(吴淞零点起算), 1 万吨级集装箱码头前沿底高程为 -8.90 m, 码头宽度为 29 m。参考临近工程常规结构, 码头拟采用高桩梁板形式, 排架间距取 $7\sim 8$ m, 桩基采用直径 $800\sim 1\,000$ mm PHC 桩。码头结构采用两种方案进行比选, 其桩基承载力

计算值富余度均为 10% 。方案 1 排架间距为 8 m, 桩基采用 6 根直径 $1\,000$ mm PHC 桩; 方案 2 排架间距为 7 m, 桩基采用 8 根直径 800 mm PHC 桩, 码头结构断面见图 1。

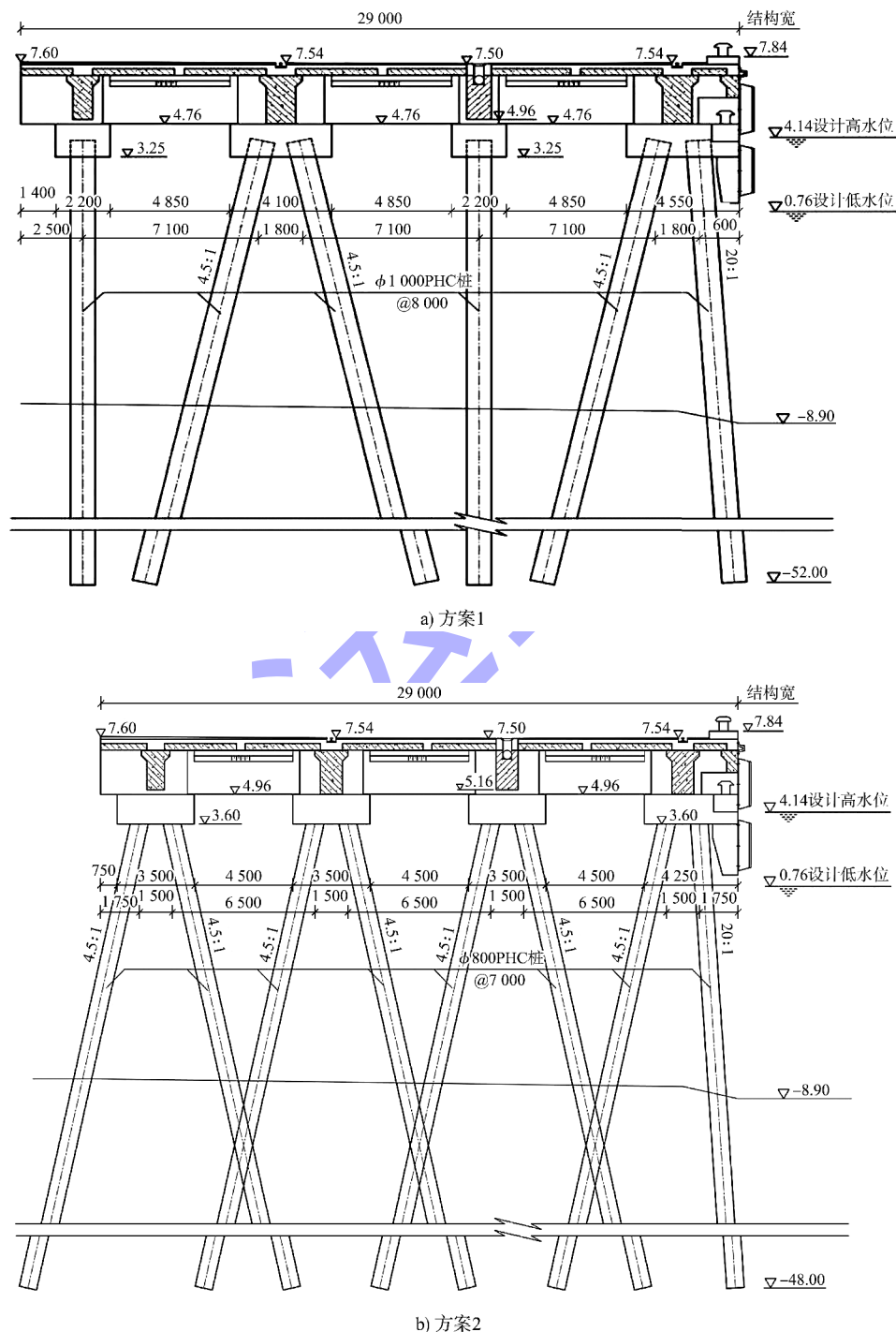


图 1 码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

Fig.1 Wharf structure section (elevation: m; dimension: mm)

码头结构桩基计算结果见表 1。可以看出,两个方案的桩基承载力以及桩基抗弯能力均可以满足要求;考虑偏心受压构件的附加弯矩后,弯矩值较原始计算值大幅增加,可以达到初始计算值的 3~4 倍。对于 1 万吨级集装箱码头,直径 800 和 1 000 mm PHC 桩对应的长细比为 12~14, η 计算值最大可达到 2.0~2.5。两方案由土层控制的单桩轴向承载力的安全富余度基本都在 10%左右,但考虑偏心受压附加弯矩后,直径 800 mm PHC 桩的抗弯能力仅有 10%的安全富余度,而直径 1 000 mm PHC 桩尚有 40%的安全富余度。分析可以得出,对于直径 1 000 mm 及以上尺度的 PHC

桩,由土层控制的桩基承载力仍是承载力的控制性因素,桩基的压曲稳定一般能够满足要求,而小尺度桩对于压曲稳定更敏感,如果码头等级进一步提升,前沿底高程继续增加,方案 2 结构的压曲稳定抗弯能力可能无法满足要求。

经计算,方案 1 单位面积造价为 9 372 元/m²,方案 2 单位面积造价为 9 765 元/m²,两方案基本持平,差值在 4%左右。考虑到方案 1 的偏心受压承载能力安全储备较大,可为后续码头升级预留空间,且项目属于改造类项目,方案 1 的桩基数量较少,在现有码头原址施工时碰桩可能性更小。综上,选择 6 根直径 1 000 mm PHC 桩的方案 1 作为推荐方案。

表 1 码头结构桩基计算结果
Tab. 1 Calculation results of wharf structure pile foundation

工况	桩径/ mm	桩帽底 高程/m	泥面 高程/m	T/m	l_c/m	l_0/h	η	桩基承载力 (土层控制)/kN	桩基承载力 富余度/%
轴力最大	800	3.60	-8.9	2.6	11.47	14.3	2.52	4 319	110
	1 000	3.25	-8.9	3.0	12.08	12.1	2.04	6 240	112
弯矩最大	800	3.60	-8.9	2.6	11.47	14.3	1.43	4 319	202
	1 000	3.25	-8.9	3.0	12.08	12.1	1.37	6 240	211

工况	N/kN	$M/(kN\cdot m)$	e_0/mm	e_a/mm	e_s/mm	考虑附加弯矩后的 弯矩/(kN·m)	轴力对应的抗弯 能力/(kN·m)	抗弯能力 富余度/%
轴力最大	3 912	157	45	27	72	689	750	109
	5 580	337	60	33	93	1 069	1 500	140
弯矩最大	2 136	482	226	27	253	773	950	123
	2 961	693	234	33	267	1 082	1 850	171

4 结语

1) 以上海港罗泾港区码头改造项目为例,当直径 800 和 1 000 mm PHC 桩的桩基承载力富余度为 10%时,直径 800 mm 桩的抗弯能力富余度也为 10%,而直径 1 000 mm 桩的抗弯能力富余度为 40%,安全储备较大。

2) 通常条件下,对于直径 1 000 mm 及以上的大尺度桩,压曲稳定不是其承载力的控制性因素,承载力基本由土层控制,其对于桩长的变化敏感性较差,更适合应用于大型码头。

3) 对于小尺度桩,当泥面以上桩长较大或泥面以下较大深度范围内存在软弱土层、可液化土层时,桩基的压屈稳定可能成为影响桩基承载力的控制因素。

4) 如受外部条件限制,需要在大型码头结构

中采用较小尺度桩,可采用减小排架间距或增加排架内桩基数量等手段控制桩基内力。

参考文献:

[1] 殷雅俊. 材料力学[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
YIN Y J. Mechanics of materials[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2019.

[2] 王长连, 孟庆东, 刘荣华, 等. 结构力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
WANG C L, MENG Q D, LIU R H, et al. Structural mechanics[M], Beijing: Tsinghua University Press, 2020.

[3] 冯贤桂. 细长压杆临界压力欧拉公式的统一推导[J]. 力学与实践, 2003, 25(4): 65-67.
FENG X G. A unified method to derive formulas for Euler's critical load of slender columns[J]. Mechanics and

- engineering, 2003, 25(4): 65-67.
- [4] 河海大学, 武汉大学, 大连理工大学, 等. 水工钢筋混凝土结构学[M]. 4 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
Hohai University, Wuhan University, Dalian University of Technology, et al. Hydraulic reinforced concrete structure [M]. 4th ed. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [5] 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.
Design code for wharf structures: JTS 167-2018 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2018.
- [6] 水运工程桩基设计规范: JTS 147-7—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
Code for design of pile foundation on port and waterway engineering: JTS 147-7-2022 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.
- [7] 赵娟, 池海. 预制预应力混凝土空心方桩在大吨位码头应用分析[J]. 港工技术, 2016, 53(5): 35-37.
ZHAO J, CHI H. Application of precast pre-stressed concrete hollow square pile in the port of big deadweight tonnage [J]. Port engineering technology, 2016, 53(5): 35-37.
- [8] 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.
LI C X. Discussion on effective length coefficient of pile foundation compression-buckling stability in waterway engineering[J]. Port & waterway engineering, 2019(12): 127-132, 163.
- [9] 港口工程混凝土结构设计规范: JTJ 267—1998[S]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
Design code for harbour engineering concrete structures: JTJ 267-1998[S]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [10] 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.
Design code for concrete structures of port and waterway engineering: JTS 151-2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- (本文编辑 王传瑜)
- ~~~~~
- (上接第 81 页)
- [6] 王廷魁, 胡攀辉, 杨喆文. 基于 BIM 与 AR 的施工质量控制研究[J]. 项目管理技术, 2015(5): 19-23.
WANG T K, HU P H, YANG Z W. Research on construction quality control based on BIM and AR [J]. Project management technology, 2015(5): 19-23.
- [7] 胡从超. BIM 技术在水利工程安全管理中的运用研究[J]. 水上安全, 2024(20): 7-9.
HU C C. Application of BIM technology in safety management of water conservancy projects [J]. Maritime safety, 2024(20): 7-9.
- [8] 张亚飞, 魏兰, 李俊豪, 等. 基于 BIM+AR 技术在水利工程中施工安全管理的应用研究[J]. 中国设备工程, 2023(4): 9-11.
ZHANG Y F, WEI L, LI J H. Application of BIM+AR technology in construction safety management of water conservancy projects [J]. China plant engineering, 2023(4): 9-11.
- [9] 王琮皓. BIM+AR 技术在建筑运维管理中的应用研究[D]. 开封: 河南大学, 2019.
WANG C H. The application research of BIM + AR technology in construction operation and maintenance management[D]. Kaifeng: Henan University, 2019.
- [10] 田会静, 明亮, 李桐林, 等. BIM+AR 在烟台港西港区液化天然气项目配套码头工程中的应用[J]. 水运工程, 2024(9): 204-208.
TIAN H J, MING L, LI T L, et al. Application of BIM+AR in supporting terminal engineering of liquefied natural gas project in west port area of Yantai Port[J]. Port & waterway engineering, 2024(9): 204-208.
- [10] 水运工程设计信息模型应用标准: JTS/T 198-2—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Standard for application of design information modeling in port and waterway engineering: JTS/T 198-2-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [11] 水运工程施工信息模型应用标准: JTS/T 198-3—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.
Standard for application of building information modeling in port and waterway engineering construction: JTS/T 198-3-2019 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- (本文编辑 王璁)