



基于二维与三维高桩码头模型的 船舶系缆力分配系数研究

柳其岩, 于永玲, 赵雅纯

(中交第三航务工程局有限公司南京分公司, 江苏 南京 210011)

摘要: 高桩码头因其诸多优点, 在实际工程中的应用愈加广泛。船舶系缆力是高桩码头结构设计的关键参数, JTS 167—2018《码头结构设计规范》将船舶系缆力的横向分力依照特定系数分配至排架。然而, 实际工程中系缆力为包含横向、纵向和竖向的三维合力, 并非单一横向水平力。以高桩板梁式码头的实际设计案例为基础, 利用易工与 ROBOT 软件, 对高桩板梁式码头排架进行二维与三维模型的船舶系缆力分配系数进行对比分析, 并给出实际工程设计的建议。结果表明, 拟定工况下, 设计规范中的分配系数取值偏小; 易工二维模型的计算方法将垂向力依照竖向力的分配系数处理以及忽视了纵向力的作用, 可能低估船舶系缆力产生的影响。

关键词: 高桩码头; 船舶系缆力; ROBOT 模型; 易工模型; 分配系数

中图分类号: U656.1+13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0069-07

Ship mooring force distribution coefficient based on pile-supported wharf 2D and 3D models

LIU Qiyang, YU Yongling, ZHAO Yachun

(Nanjing Branch of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Nanjing 210011, China)

Abstract: Pile-supported wharves are increasingly utilized in practical engineering due to their numerous advantages. The mooring force of a ship is a critical parameter in the structural design of pile-supported wharves. According to the JTS 167-2018 *Design Code for Wharf Structures*, the transverse component of the mooring force is distributed to the frame bent based on specific coefficients. However, the mooring force is a three-dimensional resultant force in the actual engineering encompassing lateral, longitudinal, and vertical components in reality, rather than a single lateral horizontal force. On the basis of a practical design case of a pile-supported beam-slab wharf, we apply Yigong and ROBOT software, conduct a comparative analysis of ship mooring force distribution coefficients of 2D and 3D models aiming at framed bent of the pile-supported beam-slab wharf, and provide recommendations for the practical engineering design. The results indicate that under the proposed conditions, the distribution coefficients specified in the design code underestimate the values. The calculation method of the Yigong 2D model processes vertical forces using horizontal distribution coefficients and neglects the effects of longitudinal forces, potentially underestimating the impact of mooring forces.

Keywords: pile-supported wharf; ship mooring force; ROBOT model; YiGong model; distribution coefficient

高桩板梁式码头是一种以高桩基础为主要支撑结构, 通过板梁组合形成上部承载体系的港口工程结构形式。它的显著特点包括: 受力体系明

确, 排架间距较大, 桩基能够均匀分担上部荷载, 从而显著提高结构的整体稳定性和承载能力; 施工快捷, 采用预制桩和构件, 提升装配化程度; 结

收稿日期: 2024-11-26

作者简介: 柳其岩 (1999—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事码头结构设计。

构经济性突出,上部结构较薄,材料消耗较少^[1]。随着我国港口建设的不断发展,高桩码头的应用愈加广泛。

易工和 Autodesk ROBOT 是常用的两款高桩板梁式码头建模软件。易工是依据相关规范开发的工程辅助设计工具,专注于高桩板梁式码头的快速建模与规范化分析^[2]; Autodesk ROBOT 是全球知名的结构分析与设计工具,广泛应用于大型场馆、桥梁、码头及其他复杂建筑的设计与分析。

船舶系缆力是高桩码头结构设计的关键参数^[3-4]。系缆力可以分解为横向、纵向和竖向三个维度的力。若结构内力仍采用易工二维平面简化方法进行计算^[5],忽略船舶系缆力纵向力对排架结构的影响,可能导致与实际排架受力之间存在一定偏差。同时, JTS 167—2018《码头结构设计规范》^[6]提供的横向力排架分配系数在实际工程中的精确度,仍需要进一步探究。此外,易工模型考虑系缆力竖向力分配时,采用的分配系数与横

向力一致,此方法存在优化空间。基于此,本文在二维易工模型的基础上,结合 Autodesk ROBOT 进行三维建模分析,对船舶系缆力作用下高桩板梁式码头排架分配系数进行研究,旨在为高桩码头的结构计算提供科学参考和有益指导。

1 工程概况

本文基于实际工程案例,选取一段典型的高桩板梁式码头结构进行分析,其结构断面形式见图 1。码头桩台平面纵向长度为 68 m,横向宽度为 28 m,顶面高程为 5.70 m,设计泥面底高程为 -16.60 m,前沿系缆柱设计大小为 1 500 kN。上部结构由现浇横梁、预制纵梁以及叠合板组成,其中预制面板厚度为 0.3 m,现浇面板厚度为 0.15 m。排架的横向间距为 8.0 m,每榀排架包含 4 根直桩和 2 对斜桩,斜桩采用 5:1 的斜度布置,转角大小为 22°。桩基选用预应力高强混凝土 (PHC) 管桩,长度为 58 m,外径 $D=1$ m,壁厚 $\delta=0.013$ m。

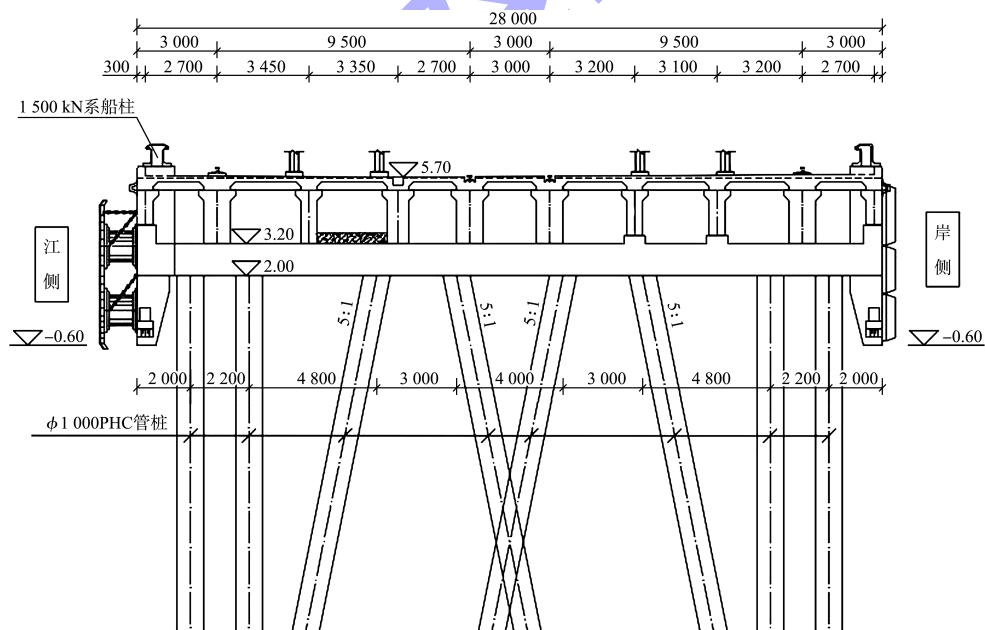


图 1 高桩板梁式码头结构断面 (尺寸: mm; 高程: m)

Fig. 1 Structural cross-section of pile-supported beam-slab wharf (dimension: mm; elevation: m)

2 模型设计

本文主要对船舶系缆力进行探究计算,系缆力可以根据系船缆的角度分解为横向、纵向、竖

向 3 个力,计算公式为:

$$F_x = F \sin \alpha \cos \beta \quad (1)$$

$$F_y = F \cos \alpha \cos \beta \quad (2)$$

$$F_z = F \sin \beta \tag{3}$$

式中： F 为船舶系缆力,kN； F_x 、 F_y 、 F_z 分别为船舶系缆力沿横向、纵向以及竖向的分力,kN； α 为系船缆的水平投影与码头前沿线的夹角,(°)； β 为系船缆与水平面之间的夹角,(°)。

JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[7]指出,海船码头结构类型中, $\alpha = 30^\circ$ 、 $\beta = 15^\circ$,本文船舶系缆力 F 取 1500 kN,根据式(1)~(3),计算得

$F_x = 724.4 \text{ kN}$ 、 $F_y = 1\,253.3 \text{ kN}$ 、 $F_z = 388.2 \text{ kN}$ 。JTS 167—2018《码头结构设计规范》表明横向分力需要根据码头结构段跨数以及受力排架进行再分配,参照 JTS 167—2018《码头结构设计规范》附录 F,结合本文工程案例,码头结构段跨数为 8、排架数为 9,受力排架分别为 1[#]、5[#]、9[#]时的分配系数见表 1。

表 1 水平集中力的横向分力在码头排架中的分配系数

Tab. 1 Distribution coefficient of lateral component of horizontal concentrated forces in wharf framed bent										
码头结构 断跨数	受力 排架	排架分配系数								
		1 [#] 排架	2 [#] 排架	3 [#] 排架	4 [#] 排架	5 [#] 排架	6 [#] 排架	7 [#] 排架	8 [#] 排架	9 [#] 排架
8	1 [#]	0.379	0.311	0.244	0.177	0.111	0.044	-0.023	-0.088	-0.155
8	5 [#]	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111	0.111
8	9 [#]	-0.155	-0.088	-0.023	0.044	0.111	0.177	0.244	0.311	0.379

依照码头的设计参数以及图 1,采用易工软件建立二维高桩板梁式码头结构模型,二维平面结果见图 2a)。船舶系缆力作用点位于码头前沿,作用排架设计为 5[#]排架, $F = 1\,500 \text{ kN}$ 、 $\alpha = 30^\circ$ 、 $\beta = 15^\circ$,作用点高程 $z = 5.7 \text{ m}$,与江测的码头前沿距离 $x = 0.75 \text{ m}$ 。

易工模型的设计工况见表 2,考虑是否对船舶竖向力乘分配系数,分别对模型进行计算,对应排架效应标准值结果见图 2b)、c)。二维易工模型采用 JTS 167—2018《码头结构设计规范》的系数(0.111)对系缆力横向力进行分配,考虑船舶竖向力分配时,对应分配系数与横向力分配系数相一致,为 0.111。同时结合图 2b)、c)可以发现二维易工模型计算 $F_y = 0 \text{ kN}$,忽略了船舶系缆力纵向力的作用。

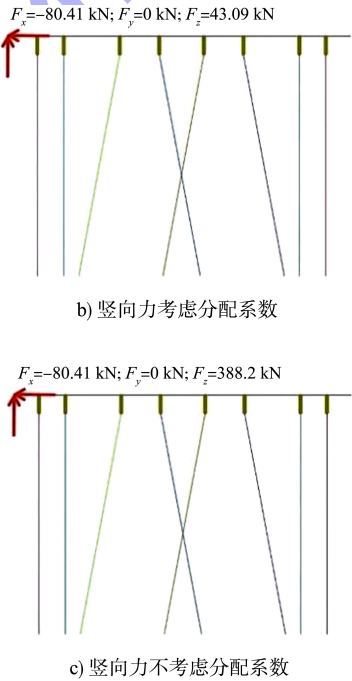
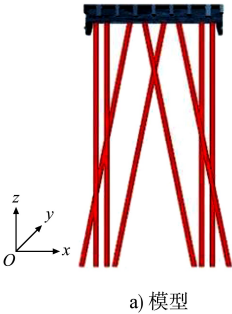


图 2 二维易工模型与计算结果
Fig. 2 2D Yigong model and calculated results

表 2 二维易工模型设计工况
Tab. 2 Design conditions of 2D Yigong model

工况	荷载 类型	荷载 大小/kN	$\alpha/$ (°)	$\beta/$ (°)	竖向力 分配系数	作用 排架
1-1	系缆力	1 500	30	15	分配	5 [#]
1-2	系缆力	1 500	30	15	不分配	5 [#]

在易工模型基础上，建立等效三维 ROBOT 模型，三维模型更接近码头实际的情况。横梁、纵梁与桩基采用梁单元，截面类型与材料特性与易工模型保持一致，桩基在泥面下对应施加地基力^[8]。面板采用板单元，计算模型为荷载传递板（双向）。在建模过程中需要对实际条件进行部分的理想化如二维模型中的靠船构件，在对计算结果影响不大的情况下，进行优化，减少计算量^[9]。模型结果见图 3，船舶系缆力在每个排架上的施加位置与易工模型保持一致。

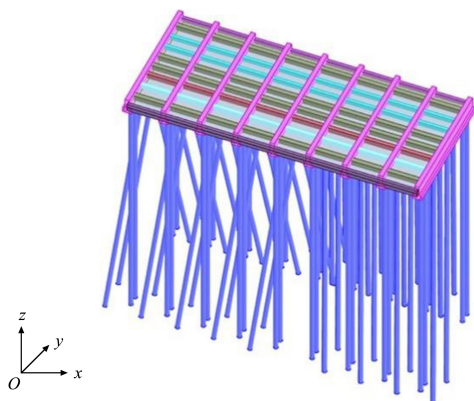


图 3 三维 ROBOT 模型
Fig.3 3D ROBOT model

三维 ROBOT 模型设计工况见表 3，工况 2-2、2-5、2-8 与表 2 中易工模型结果形成对照。剩余工况考虑了系缆力保持一定的情况下，作用于不同排架时的分配系数，将 ROBOT 模型计算结果与 JTS 167—2018《码头结构设计规范》中水平集中力的横向分力在排架中的分配系数进行对比，同时探究竖向力以及纵向力在排架中的分配系数。

表 3 三维 ROBOT 模型设计工况
Tab.3 Design conditions of 3D ROBOT model

工况	荷载类型	荷载大小/kN	作用排架
2-1	系缆力横向分力	-724. 4	1 [#]
2-2			5 [#]
2-3			9 [#]
2-4	系缆力纵向分力	-1 253. 3	1 [#]
2-5			5 [#]
2-6			9 [#]

续表3

工况	荷载类型	荷载大小/kN	作用排架
2-7	系缆力竖向分力	388. 2	1 [#]
2-8			5 [#]
2-9			9 [#]

3 结果分析

3.1 系缆力横向分力结果分析

对系缆力横向分力作用下 ROBOT 模型的结果进行分析，统计不同工况下 9 个排架的横向位移。排架的位移方向与横向力方向一致时为正。通过将每个排架的横向位移除以横向位移总和，得到各排架的分配系数，结果见表 4。当系缆力的横向力单独作用时，仅考虑排架的横向位移，尽管整体结构可能因连接效应等因素产生垂向或纵向位移，但这些位移并不能准确反映横向力的分配效果。垂向力以及纵向力作用下排架的分配系数计算方式与横向力相一致。

表 4 各码头排架船舶系缆力横向分力分配系数与水平位移
Tab.4 Lateral component distribution coefficients of ship mooring forces and horizontal displacements in each wharf framed bent

工况	排架	分配系数	水平位移/cm
2-1	1 [#]	0. 841	0. 443
	2 [#]	0. 640	0. 337
	3 [#]	0. 469	0. 247
	4 [#]	0. 318	0. 168
	5 [#]	0. 180	0. 095
	6 [#]	0. 049	0. 026
	7 [#]	-0. 075	-0. 040
	8 [#]	-0. 198	-0. 104
	9 [#]	-0. 327	-0. 172
2-2	1 [#]	0. 180	0. 100
	2 [#]	0. 188	0. 100
	3 [#]	0. 205	0. 113
	4 [#]	0. 231	0. 127
	5 [#]	0. 269	0. 150
	6 [#]	0. 225	0. 124
	7 [#]	0. 193	0. 106
	8 [#]	0. 170	0. 094
	9 [#]	0. 156	0. 086

续表4

工况	排架	分配系数	水平位移/cm
2-3	1 [#]	-0.327	-0.189
	2 [#]	-0.203	-0.117
	3 [#]	-0.085	-0.049
	4 [#]	0.032	0.018
	5 [#]	0.156	0.090
	6 [#]	0.293	0.169
	7 [#]	0.443	0.256
	8 [#]	0.612	0.354
	9 [#]	0.810	0.468

横向力作用于 1[#]排架时，横向力分配系数在 1[#]排架最大，分配系数为 0.443，作用在 9[#]排架时，分配系数最大为 0.468，两者不完全相等，这是由于码头结构中斜桩投影不完全对称导致。相较于 JTS 167—2018《码头结构设计规范》中，横向力作用于 1[#]排架时分配系数为 0.379，模型计算结果与规范值的相对误差为 16.9%，模型结果相较于规范值偏大，这个结果与赵冲久等^[10]、徐凤娇^[11]的结果一致。作用于 5[#]排架时，规范中每个排架系数为 0.111，而本文模型结果表明，在此情况下，5[#]排架分配系数最大 0.15，往两侧排架分配系数依次减小，最小为 0.086，与规范值的相对误差范围为-22%~35%。相同工况下，模型分配系数与规范分配系数的对比见图 4。可以看出，模型结果与规范在系数的分配规律上相一致，但不难看出，横向力直接作用的排架分配系数取值偏小，结合徐凤娇的研究，当码头存在斜桩时，码头

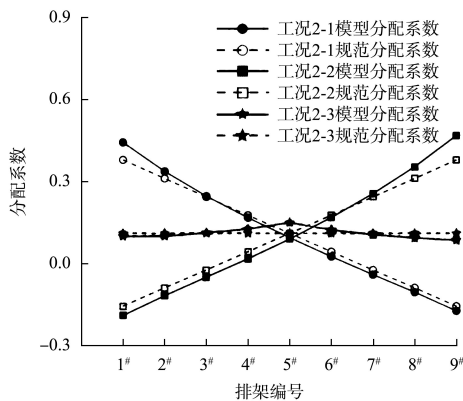


图 4 横向力作用下排架分配系数
Fig. 4 Distribution coefficient of framed bent under lateral force

水平刚性系数相较直桩码头偏大，二维易工模型设计时可以考虑适当提高分配系数，更加接近系缆力横向分力的实际作用效果。

3.2 系缆力竖向分力结果分析

工况 2-4~2-6，模型仅考虑系缆力竖向分力对排架的作用，统计排架竖向位移，分配系数计算结果见表 5。可以看出，竖向力单独作用下，直接作用排架的分配系数最大，3 种工况下 1[#]、5[#]、9[#]排架的分配系数分别为 0.817、0.052、0.817。JTS 167—2018《码头结构设计规范》中水平力分配系数分别为 0.379、0.111、0.379，绝对误差分别为 0.438、0.59、0.438，两者相差较大。

表 5 各码头排架船舶系缆力竖向分力分配系数与竖向位移
Tab. 5 Vertical component distribution coefficients of ship mooring forces and vertical displacements in each wharf framed bent

工况	排架	竖向位移/cm	分配系数
2-4	1 [#]	0.085	0.817
	2 [#]	0.023	0.221
	3 [#]	0	0
	4 [#]	-0.003	-0.028
	5 [#]	-0.001	-0.010
	6 [#]	0	0
	7 [#]	0	0
	8 [#]	0	0
	9 [#]	0	0
2-5	1 [#]	-0.001	-0.010
	2 [#]	-0.001	-0.010
	3 [#]	0.004	0.039
	4 [#]	0.024	0.231
	5 [#]	0.052	0.500
	6 [#]	0.024	0.231
	7 [#]	0.004	0.039
	8 [#]	-0.001	-0.010
	9 [#]	-0.001	-0.010
2-6	1 [#]	0	0
	2 [#]	0	0
	3 [#]	0	0
	4 [#]	0	0
	5 [#]	-0.001	-0.010
	6 [#]	-0.003	-0.028
	7 [#]	0	0
	8 [#]	0.023	0.221
	9 [#]	0.085	0.817

竖向力作用下排架分配系数见图 5。可以看出,系缆力的竖向分力作用下,排架分配系数的趋势与规范的水平力分配系数规律差异较大,竖向分力仅仅传递相邻的排架,不再继续分配。在二维易工模型中,若按照水平力分配系数对竖向力进行分配,将导致排架受力计算不准确。为更精确地考虑系缆力的影响,可以根据系船缆的角度将系缆力分解,考虑竖向力分配系数,在二维易工模型中对竖向力单独输入。

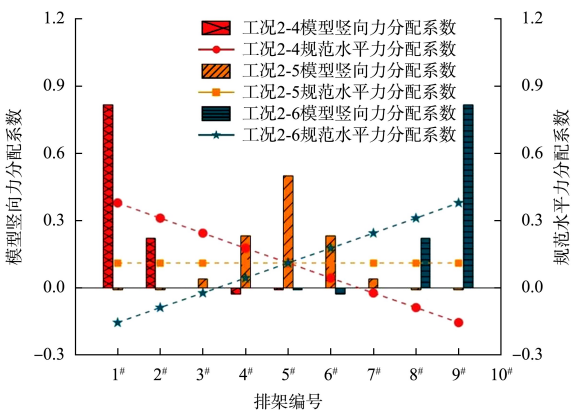


图 5 垂向力作用下排架分配系数
Fig. 5 Distribution coefficients of framed bents under vertical force

3.3 系缆力纵向分力结果分析

工况 2-7~2-9 考虑系缆力纵向分力对排架的作用,排架分配系数计算结果见表 6。根据工况 2-7 结果可以看出,纵向力作用于 1#排架时,1#排架的分配系数最大为 0.114,9#排架分配系数最小 0.11,9#排架与 1#排架分配系数相对误差为 3.6%,相对误差较小。根据图 6 可知,工况 2-

7 整

体上呈现 9 个排架均匀分配。工况 2-8、2-9 模型结果与工况 2-7 一致,纵向力作用下排架的分配系数呈现均匀分配的趋势,船舶系缆力的纵向分力会对码头结构产生作用,若忽略纵向分力的作用,会对设计和安全分析的准确性产生一定影响。

表 6 各码头排架船舶系缆力纵向分力分配系数与纵向位移
Tab. 6 Longitudinal component distribution coefficients of ship mooring forces and longitudinal displacements in each wharf framed bent

工况	排架	纵向位移/cm	分配系数
2-7	1#	1.867	0.114
	2#	1.849	0.112
	3#	1.838	0.112
	4#	1.829	0.111
	5#	1.824	0.111
	6#	1.820	0.110
	7#	1.817	0.110
	8#	1.815	0.110
	9#	1.815	0.110
2-8	1#	1.824	0.111
	2#	1.825	0.111
	3#	1.827	0.111
	4#	1.833	0.111
	5#	1.843	0.112
	6#	1.834	0.111
	7#	1.829	0.111
	8#	1.826	0.111
	9#	1.825	0.111
2-9	1#	1.815	0.110
	2#	1.815	0.110
	3#	1.817	0.110
	4#	1.820	0.111
	5#	1.825	0.111
	6#	1.832	0.111
	7#	1.841	0.112
	8#	1.853	0.112
	9#	1.970	0.113

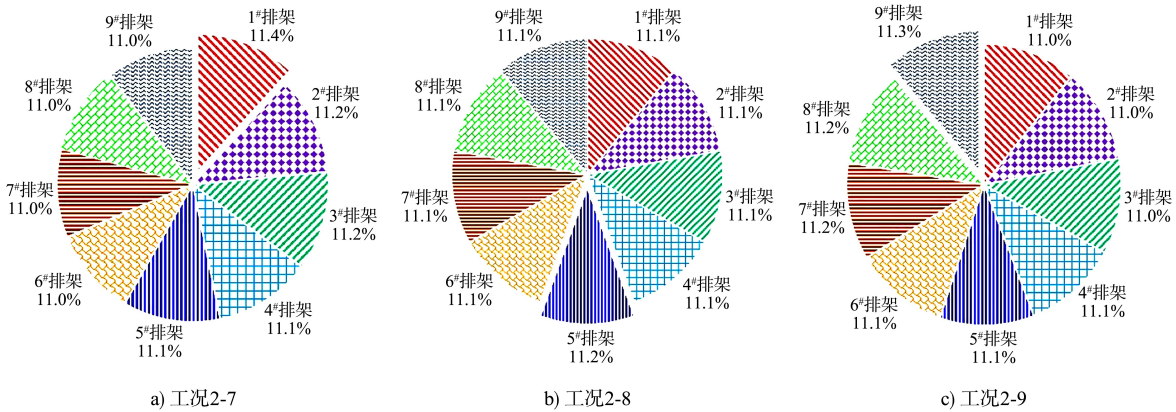


图 6 纵向力作用下排架分配系数
Fig. 6 Distribution coefficient of framed bent under longitudinal force

4 结论

1) 基于本文的工程案例, JTS 167—2018《码头结构设计规范》中系缆力作用排架的横向力分配系数取值偏小, 采用二维易工模型进行计算时, 建议适当提高直接受力排架的分配系数, 以更准确地反映实际工况。

2) 三维 ROBOT 模型结果表明, 船舶系缆力的竖向分力主要集中在直接受力排架上。二维易工模型中使用横向力的分配系数对竖向力进行分配, 可能会导致排架受力结果与实际情况存在偏差。

3) 三维 ROBOT 模型分析结果显示, 船舶系缆力的纵向分力会对码头结构产生影响, 排架分配系数呈现均匀分布; 二维易工模型是基于平面计算, 未考虑纵向力的作用, 可能导致计算结果存在局限性。

4) 现有研究表明, 排架分配系数与码头结构类型、排架间距、跨数等因素密切相关。本文结合实际工程案例, 针对具体结构特点进行探究分析, 结果可为高桩梁板式码头的结构设计提供有益参考。

参考文献:

- [1] 董思远, 尹德军. 影响高桩码头横向水平力分配的因素分析[C]//中国水运建设行业协会工程勘察设计及标准化专业委员会, 中国水运建设行业协会信息建设专业委员会, 中国水运建设行业协会工程建设及材料设备专业委员会, 等. 自动化集装箱码头应用技术交流会论文集. 北京: 中国水运建设行业协会工程勘察设计及标准化专业委员会, 2015: 298-301.
- DONG S Y, YIN D J. Influence factors for the distribution of transverse force on piled wharf [C]//China Water Transport Construction Industry Association Engineering Survey and Design and Standardization Professional Committee, China Water Transport Construction Industry Association Information Construction Professional Committee, China Water Transport Construction Industry Association Engineering Construction and Material Equipment Professional Committee, et al. Proceedings of the Automation Container Terminal Application Technology Exchange Conference. Beijing: China Water Transport Construction Industry Association Engineering Survey and Design and Standardization Professional Committee, 2015: 298-301.
- [2] 夏晓喻. 高桩码头水平集中力在排架中的分配系数探讨[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(8): 266-267, 296.
- XIA X Y. Discussion on the distribution coefficient of horizontal concentrated force in high-pile wharf frames[J]. China water transport (the second half of the month), 2016, 16(8): 266-267, 296.
- [3] 徐凤娇, 陈廷国, 侯永为. 转动刚度对水平力在高桩码头排架中的分配影响研究[J]. 水运工程, 2015(1): 98-103.
- XU F J, CHEN T G, HOU Y W. Influence of rotational stiffness on distribution coefficient of horizontal force in the bents of high-piled wharf [J]. Port & waterway engineering, 2015(1): 98-103.
- [4] 董思远, 戈国庆, 周鹏, 等. 全直桩码头转动刚度对水平力分配的影响[J]. 水运工程, 2019(5): 73-77, 108.
- DONG S Y, GE G Q, ZHOU P, et al. Influence of rotational stiffness on distribution of horizontal forces on all-vertical-piled wharf structures [J]. Port & waterway engineering, 2019(5): 73-77, 108.
- [5] 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 X S, LU Z A, SHEN J L. On distribution coefficient of horizontal force in the bents of high-piled wharf[J]. Port & waterway engineering, 2011(7): 76-82.
- [6] 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.