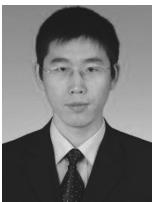


· 港 口 ·



摩擦板支撑型高桩梁板码头设计

王君辉

(中交第二航务工程勘测设计院有限公司, 湖北 武汉 430060)

摘要: 桩基结构设计是高桩码头设计的重点, 常规高桩码头水平荷载完全由桩基本身承担, 从而导致码头桩基数量多、尺度大、工程造价高。针对水平荷载导致码头桩基结构增加的难题, 通过在码头后方设置摩擦板支撑系统, 承担水平荷载, 并利用有限元计算方法与传统高桩码头进行对比计算, 揭示摩擦板支撑系统的作用机理和作用效果。结果表明, 摩擦板支撑系统可大幅降低桩基内力, 从而减少桩基数量、优化结构尺度、节约工程投资。

关键词: 摩擦支撑板; 高桩梁板码头; 设计

中图分类号: U 656.1⁺13

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)09-0033-05

Design of pile supporting beam and slab wharf with anchored friction plate

WANG Jun-hui

(CCCC SecondHarbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: The design of pile foundation is the key point in the design of pile supporting wharves. The horizontal load of the normal pile supporting wharf is completely borne by the pile foundation, which leads to a large number of piles, large scale, and high cost. In view of the problem that the horizontal load leads to the increase of pile, we set the anchored friction plate support system at the rear of the wharf to bear the horizontal load, use the finite element calculation method to compare with the normal structure and reveal the mechanism and effect of the anchored friction plate support system. The results show that the anchored friction plate support system can greatly reduce the internal friction of the pile and the number of pile foundations, optimize the structure scale and save the project investment.

Keywords: anchored friction plate; pile supporting beam and slab wharf; design

接岸满堂式高桩码头前沿常须根据靠泊船舶吃水进行深度疏浚, 船舶越大水深要求越高, 导致高桩码头桩基自由长度随之变大。根据桩基压弯原理可知, 自由长度增加对桩身压弯稳定性呈指数型衰减, 因而满足船舶靠泊需求的桩基数量、桩基直径明显增加, 进一步导致工程造价、工程周期增加。

常规高桩码头的主要荷载包括: 自身重力、堆货及设备重力、船舶水平荷载、环境荷载等^[1], 其中水平荷载对桩基直径、桩基数量有决定性影响, 合理地分配码头所承受的水平荷载特别是船

舶撞击荷载, 对于减少高桩码头桩基数量, 降低整体施工费用和工期具有重要意义。本文参考 *Port designer's handbook*^[2], 对摩擦板支撑式高桩码头结构方案进行理论探讨, 为高桩码头结构方案拓展新的设计思路。

1 结构概况

摩擦板支撑式高桩码头主要应用于码头泊位紧邻陆域堆场的满堂式布置场景, 码头结构通常由竖向支持系统、上部梁板系统、后摩擦支持系统3部分组成, 见图1。

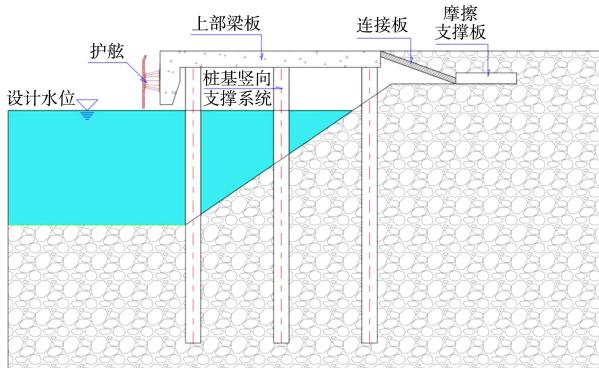


图 1 摩擦板支撑型高桩梁板码头

竖向支撑系统的主要功能是承担码头结构上部永久荷载及使用荷载，并通过支撑桩将竖向荷载传递到深层地基土中。竖向支撑桩基可采用灌注桩、PHC 桩（预应力高强混凝土桩）或钢管桩等。

上部梁板系统的主要功能是形成码头靠船作业平面，承担船舶水平荷载、设备堆货等使用荷载，并将荷载分别传递到竖向支撑系统和后摩擦支撑系统。上部梁板结构由横梁、纵梁、面板等结构组成，常采用钢筋混凝土结构，也可采用钢结构。

后摩擦支撑系统的功能是承担由上部梁板系统传递而来的船舶水平荷载，并将荷载传递给后方地基土，通过摩擦板与地基土间的摩擦力抵抗船舶水平荷载。后摩擦支撑系统由连接板、摩擦板组成，常采用钢筋混凝土结构。

2 摩擦支撑系统计算简化

由于通用有限元计算软件的广泛应用，常规高桩梁板码头结构自身不需要再做计算简化，可直接在软件中建立计算模型，但摩擦板支撑型码头结构其后支撑系统在部分软件中尚无法进行完全模拟，因而需要做结构计算简化。

摩擦支撑系统为码头结构的主要水平荷载承载单元，连接板将码头上部梁板系统承受的水平荷载传递给摩擦板，摩擦板在水平荷载作用下在板顶、底产生摩擦力，在板背产生被动土压力，当摩擦力和被动土压力大于水平荷载时摩擦板不会产生位移，码头结构稳定，因而此时摩擦支撑

系统可简化为沿码头后沿布置的一组线支撑单元，该支撑单元可进一步简化为不计土体变形的固定支座和考虑土体变形的弹性支座 2 种情景：1) 固定支座。仅考虑摩擦板承担水平荷载，因而可简化为仅承受水平荷载的单一方向固定支座。2) 弹性支座。考虑摩擦板在承受水平荷载时摩擦板本身、摩擦板与土体之间、土体自身都存在一定的弹性变形，此时摩擦板受力模式见图 2。

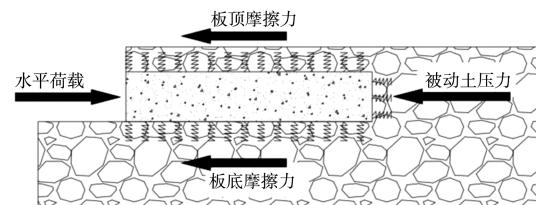


图 2 摩擦板受力

由于混凝土弹性模量远大于土体弹性模量，故摩擦板自身可视为刚体结构，在计算中可忽略其对结果的影响，仅考虑土体弹性模量。土体的弹性变形又分为摩擦面的土体剪切变形和板背面的压缩变形，进一步忽略土体剪切变形仅考虑板背侧受压土体的压缩变形，则摩擦支撑体系可按弹性地基梁法估算其弹性支撑系数。摩擦板弹性支撑系数可按式(1)^[3]计算：

$$K = k_d \beta LB \quad (1)$$

式中： k_d 为摩擦板板背土体基床系数； L 为摩擦板长度； B 为摩擦板计算支撑断面方向宽度； β 为摩擦板横剖面弯曲系数，公式为：

$$\beta = \frac{2s(\sinh\lambda + \sin\lambda)}{L(\cosh\lambda + \cos\lambda)} \quad (2)$$

式中： s 为摩擦板长度特征值； λ 为摩擦板折算长度。

3 摩擦板支撑型高桩梁板码头计算对比

3.1 工程概况

某粮食专用码头设计船型为 5 万 DWT 散货船，码头前沿设计海底高程 -12.5 m，码头面高程 2.50 m。设计靠船护舷为 SCN1400 超级锥形护舷，护舷布置间距 16 m，护舷设计反力为 2.215 MN，码头桩基采用 $\phi 1000$ mm 钻孔灌注桩，每榀排架下设 2 根桩，排架间距 8 m。上部结构包括钢筋混

混凝土横梁(宽 1 800 mm、高 2 200 mm)、纵梁(宽 1 000 mm,高 2 000 mm)和面板(厚 450 mm)。码

头下部海底坡度为 1:1。后摩擦连接板为钢筋混凝土现浇板^[4]，码头结构断面见图 3。

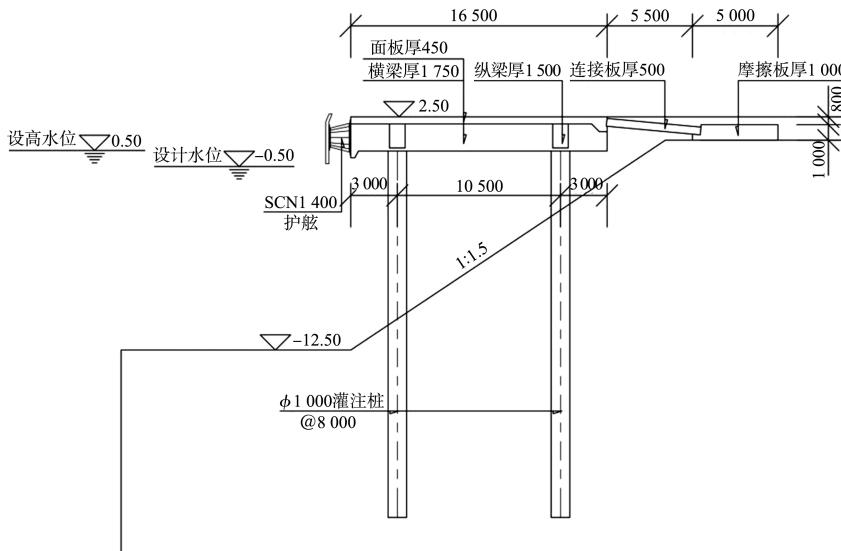


图 3 某摩擦板支撑型高桩梁板码头结构断面 (高程: m; 尺寸: mm)

3.2 摩擦板结构尺度拟定

摩擦板的主要设计参数包括板宽、板高、板长、埋深等。摩擦板为该类型结构主要水平荷载承载单元，初步分析时可假定全部水平荷载均由摩擦板的板底摩擦力和板背被动土压力承担，码头结构中的护舷反力为 2.215 MN，护舷间隔布置，故每跨排架间的摩擦板最大水平荷载 $F = 1.1075 \text{ MN}$ 。

摩擦板埋设高程通常应高于设计高水位，并尽可能减小与码头面的高差，综合考虑本工程水位及结构高程特征，摩擦板的水平承载力标准值^[5]可按式(3)计算：

$$F_k = L[f(\rho_1 g B H_1 + \rho_2 g B H_2) + (e_1 + e_2) H_2 / 2] \quad (3)$$

式中： L 为排架间距，取 8 m； B 为摩擦板顶宽，取 5 m； H_1 、 H_2 分别为摩擦板埋深、摩擦板厚度，分别取 0.8、1.0 m； f 为摩擦板与地基土间的摩擦系数，取 0.5； ρ_1 、 ρ_2 分别为摩擦板、覆盖土密度，分别取 2.4、1.8 t/m³； e_1 、 e_2 为板顶、板底的被动土压力。相关参数见图 4。

代入相关参数后可求得摩擦板水平承载力 $F_k = 1.712 \text{ MN}$ ，则摩擦支撑安全系数 $S = F_k / F = 1.55$ ，满足结构安全要求。

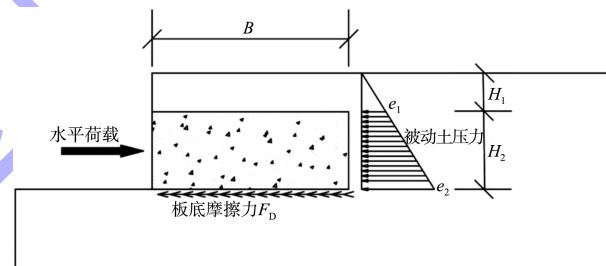


图 4 摩擦板荷载计算

3.3 码头荷载及计算软件

为便于对摩擦板支撑系统的受力机理有较为直观的认知，本文仅讨论结构在自身重力和水平船舶撞击荷载作用下的桩基、横梁内力情况，荷载组合为标准值简单组合工况。码头结构内力采用 Autodesk Robot 2018 软件进行计算分析。

3.4 结构计算工况

码头结构计算按照桩基底部支撑单元、结构后支撑单元的不同可分为 6 种工况：1) 桩底固结支撑，无侧向支撑；2) 桩底弹性支撑，无侧向支撑；3) 桩底固结支撑，侧向固结支撑；4) 桩底弹性支撑，侧向固结支撑；5) 桩底固结支撑，侧向弹性支撑；6) 桩底弹性支撑，侧向弹性支撑。

3.5 结构计算模型

1) 工况 1。将结构参数直接输入到 Robot 软件中, 其中桩基计算桩长度为桩顶到假想嵌固点长度, 经计算, 假想嵌固点位于泥面以下 4 m, 嵌固点处采用固结节点单元, 计算模型见图 5a)。

2) 工况 2。将结构参数直接输入到 Robot 软件中, 其中桩基计算桩长度为桩顶到假想嵌固点长度, 嵌固点采用竖向弹性支撑单元, 弹性系数经计算取 3 600 MN/m, 计算模型见图 5b)。

3) 工况 3。结构模型与工况 1 相同, 但在码头岸侧沿码头后边沿设置线性水平固定支座, 计算模型见图 5c)。

4) 工况 4。结构模型与工况 2 相同, 但在码头岸侧沿码头后边沿设置线性水平固定支座, 计算

模型见图 5d)。

5) 工况 5。结构模型与工况 1 相同, 仅在码头岸侧设置线性水平弹性支座, 计算模型见图 5e)。水平弹性系数按式(1)进行计算, 其中板背抛石棱体基床系数 $k_d = 60 \text{ MN/m}^3$; 摩擦板每隔 3 m 设置结构缝, 计算长度 $L = 3 \text{ m}$; 摩擦板计算断面为矩形, 计算断面宽度 $B = 1.0 \text{ m}$ 、高度 $H = 5 \text{ m}$; 混凝土弹性模量 $E = 30 \text{ GPa}$; 摩擦板横断面惯性矩 $I = 10.42 \text{ m}^4$; 摩擦板长度特征值 $s = 12.01 \text{ m}$; 摩擦板折算长度 $\lambda = 0.25$; 摩擦板弯曲系数 $\beta = 1$ 。计算得摩擦板板背抛石棱体弹性支撑系数 $K = 180 \text{ MN/m}$

6) 工况 6。结构模型与工况 2 相同, 仅在码头岸侧设置线性水平弹性支座。水平弹性系数为 180 MN/m, 计算模型见图 5f)。

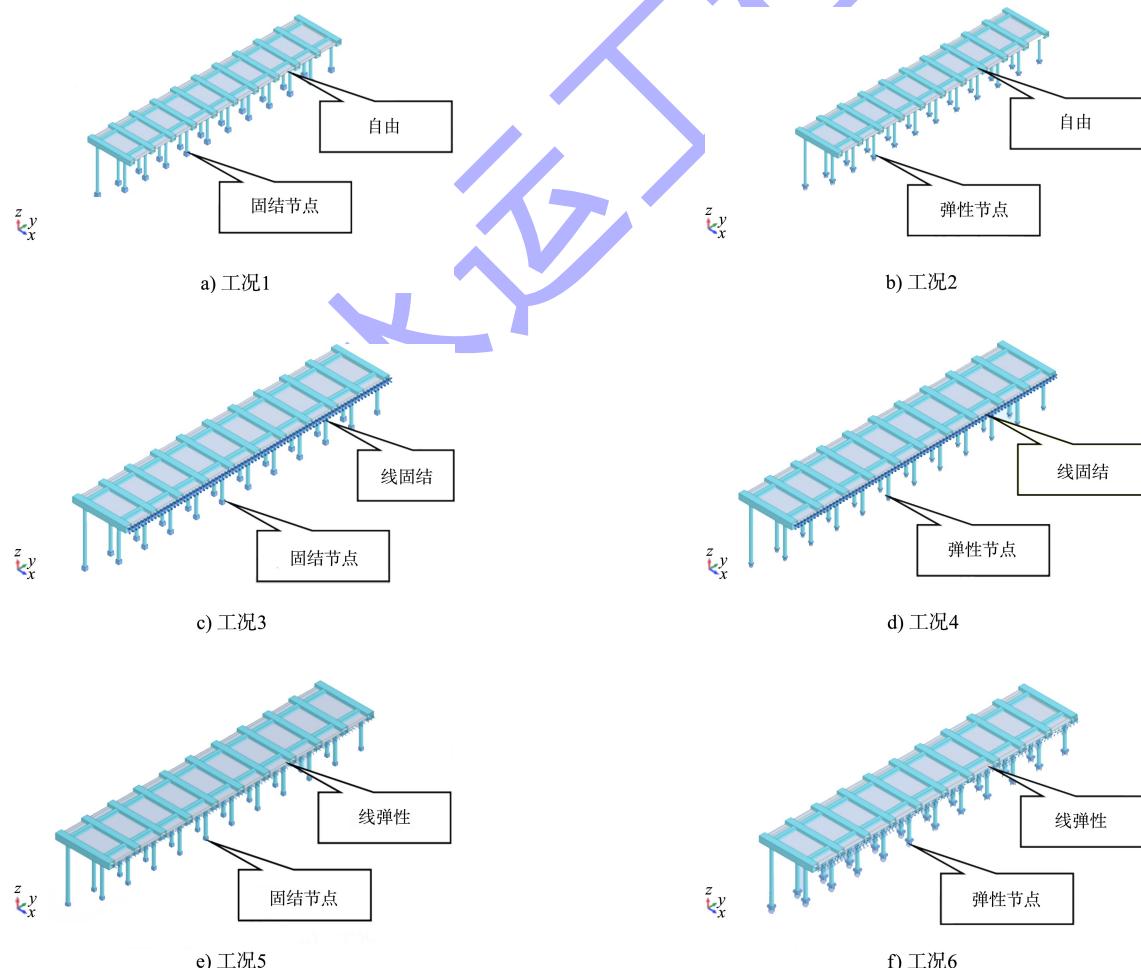


图 5 计算模型

3.6 对比

通过有限元计算不同支撑条件下的桩身内力、

桩顶位移、横梁内力, 并将计算结果进行对比, 见图 6。

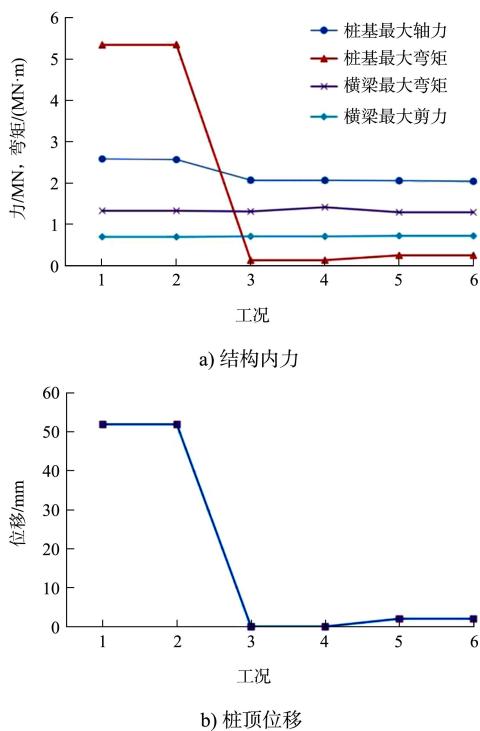


图 6 结构内力和桩顶位移对比

通过对比可知：1) 增加后支撑系统能极大降低码头桩身弯矩、水平位移，对于本结构，桩身弯矩有后支撑较无后支撑最大降幅达到 97%，但同时后支撑系统的设置对于桩基轴力、横梁内力改善作用不明显；2) 桩底固结支撑与桩底弹性支撑对计算结果的影响不明显；3) 当后支撑系统的弹性支撑系数较大时，线弹性支撑与线固定支撑计算结果差异不明显。

在考虑弹性支撑体系的前提下，为进一步探究后支撑线弹性系数与结构自身弹性系数的相关性，对结构位移开展进一步的对比计算。结构自身弹性系数是指结构在后支撑弹性系数为 0 的条件下(即工况 2)，在单位水平线荷载作用下的位移量，经计算本文结构自身弹性系数为 3 300 kN/m。当后支撑弹性系数按照与结构自身弹性系数的比值进行逐级增加时，结构桩顶位移计算结果见表 1。

表 1 不同支撑系数下位移

后弹性支撑系数与结构 弹性系数的比值	后弹性支撑系数/ (kN·m ⁻¹)	桩顶位移/ mm
0	0	53
0.10	330	45
0.50	1 650	26
1.00	3 300	19

续表1

后弹性支撑系数与结构 弹性系数的比值	后弹性支撑系数/ (kN·m ⁻¹)	桩顶位移/ mm
2.00	6 600	12
5.00	16 500	5
10.00	33 000	3
54.55	180 000	2
100.00	330 000	0

由表 1 可知，当后支撑线弹性系数为结构自身弹性系数的 5 倍时，结构计算位移较无后支撑工况降低 90.6%；当后支撑线弹性系数为结构自身弹性系数的一半时，结构计算位移较无后支撑工况降低 50.9%。

4 结语

- 1) 摩擦板支撑型高桩梁板码头结构可广泛应用于接岸满堂布置式港口，该结构类型具有受力明确、桩基精简、施工快速、造价低等优点。
- 2) 摩擦支撑板是该类码头结构设计的关键点，特别是后支撑线弹性系数对计算结果存在显著影响，应合理分析，必要时可进行相关试验。
- 3) 合理选取摩擦支撑板的结构尺寸，特别是处理好支撑板自身沉降、支撑板与码头结构不均匀沉降等，是设计须考虑的另一个重点。

参考文献：

- [1] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.海港工程设计手册[M].2 版.北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [2] THORESEN C A. Port designer's handbook [M]. 3rd ed. London: Thomas Telford Limited, 2010.
- [3] 中国船舶工业总公司第九设计研究院.弹性地基梁及矩形板计算[M].北京:国防工业出版社, 1983.
- [4] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司.保加利亚某粮食码头改扩建工程可行性研究报告[R].武汉:中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2020.
- [5] 中交第四航务工程局有限公司, 中交四航局港湾工程设计院有限公司.重力式码头设计与施工规范: JTS 167-2—2009[S].北京:人民交通出版社, 2009.