

基于水平钢架的全直桩系缆结构优化设计



张雯燕，陆敏

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司，上海 200032)

摘要：与传统斜桩结构相比，全直桩结构完全以自身抗弯能力来承受水平荷载，在相同受力条件下存在桩径大、竖向承载力没有充分发挥、工程投资偏高的特点。针对该问题，提出一种新型含水平钢架的全直桩结构，以某工程系缆墩为例，采用空间模型进行计算分析，确定优化结构方案，并在该结构的桩基中间位置利用水平钢架与桩基进行连接。结果表明，增设水平钢架可增加结构刚度、减小桩径、控制结构位移、充分发挥嵌岩桩的作用，且经济优势明显。

关键词：水平钢架；系缆墩；桩基优化

中图分类号：U 655.55

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)01-0082-05

Optimization of all-vertical-piled mooring pier based on horizontal steel truss

ZHANG Wen-yan, LU Min

(CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: Comparing to the conventional oblique pile, all-vertical-piled structure bears the horizontal load completely by its own bending resistance, the pile diameter is larger, the vertical bearing capacity is not fully developed and investment is higher under the same stress condition. Aiming at this problem, we propose a new type of all-vertical-piled pile structure with horizontal steel truss, take the certain engineering mooring pier as an example, use the space model for calculation and analysis, and determine the optimal structure scheme, and apply the horizontal steel truss to connect the pile foundation in the middle position of pile foundation. The results show that adding horizontal steel frame can increase structural stiffness, reduce pile diameter, control structural displacement, give full play to the role of rock socketed pile, and has obvious economic advantages.

Keywords: horizontal steel truss; mooring pier; pile foundation optimization

自20世纪70年代初开始，我国开展深水开放式码头建设，随着船舶的大型化和超大型化以及受现有海岸线深水资源限制，码头结构向自然条件更恶劣的离岸深水区发展。码头结构承受水平荷载越来越大，并伴随横向位移的显著增加，一般情况下通过布置斜桩承担水平荷载，并减小结构位移。但是部分码头工程基岩面埋藏浅、覆盖层薄、浪大流急，受地质条件和施工条件限制不得不采用全直桩嵌岩结构。与常规的斜桩结构相比，全直桩嵌岩结构在同等受力条件下存在桩径较大、投资较高的问题。在这种条件下，探索

新的结构形式就显得尤为重要。嵌岩桩导管架结构，与传统直桩嵌岩方案相比，结构增加了水平和斜向支撑，为空间框架结构，整体刚度强，结构性能优越。导管架结构在海上风力发电塔、海洋石油平台中有广泛运用，而在水运行业中应用较少。如果能将此结构的优势运用到全直桩系缆墩结构中，则可起到优化桩基直径、减小工程投资的作用。

港口工程中，导管架技术应用仍处于探索阶段，国外已经建成的导管架结构码头有日本苦小牧原油码头、伊朗哈格岛原油码头、阿拉斯加科

可弯油码头等, 而国内码头结构设计中尚未采用该技术。依托国家“863”课题《离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术研究》, 结合大连新港30万t进口原油码头工程案例, 陈廷国等^[1]研究基于导管架技术码头结构设计计算方法、连接构造技术、节点疲劳设计方法等; 杨国平等^[2]对桩基嵌岩连接节点进行研究, 并分析节点受力和计算方法; 王建超等^[3]对导管架码头结构疲劳可靠性进行分析研究。由于导管架码头结构对节点灌浆材料要求高且节点施工难度较大, 港口工程中没有工程案例可供借鉴, 出于诸多因素的考虑, 大连新港30万t进口原油码头最终没有采用导管架码头结构方案。近十年来, 以导管架技术为基础的海上风电基础和海上钻井平台建设进入一个高潮期, 由此全面提升了国内导管架设计、施工、材料等相关技术水平。以导管架技术为基础的码头结构研究重新进入研究者的视野。陈硕等^[4]以某原油码头靠船墩为对象, 研究靠船墩导管架结构整体系统的可靠性; 戴邦国等^[5]以舟山册子岛30万t原油码头系缆墩为研究对象, 分析不同导管架结构形式的受力特点, 得出X形导管结构力学特性最优的结论。

本文通过对导管架结构的应用现状的梳理和分析, 并结合某20万吨级码头工程进行优化方案比选, 提出一种新型含水平钢架的全直桩结构, 对其结构形式、工程投资、桩基-钢架连接方法、施工工艺等进行研究, 以期为采用钢架结构的高桩码头设计提供思路和方法。

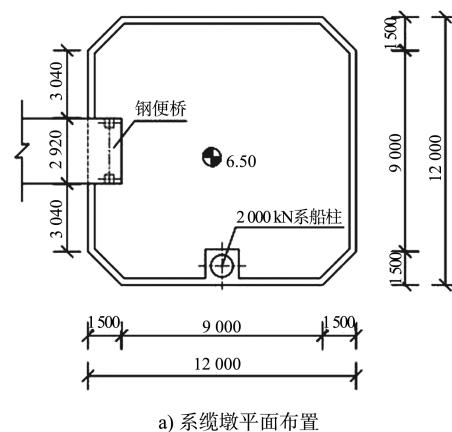
1 工程案例

研究对象为某20万吨级码头工程的系缆墩, 该码头地处外海岛礁地形, 地质基岩面起伏较大, 岩面以上覆盖层以工程力学性质较差的软土层为主, 系缆墩处基岩面以上仅分布一层厚度约15 m的淤泥质粉质黏土, 无其他力学性质较好的土层分布。

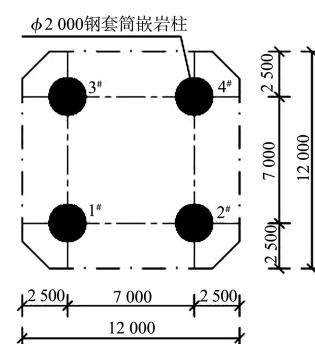
系缆墩平面呈正方形, 边长为12 m, 顶高程6.50 m, 天然泥面高程约-13.0 m。工程区域50 a

一遇设计最大H_{1%}波高为3.54 m, 波周期为7.2 s; 潮流类型属规则半日浅海潮流性质, 潮流运动呈典型往复流形态, 设计最大流速为2.0 m/s。为满足船舶带缆的使用需求, 系缆墩顶面布置1座2 000 kN系船柱。

该系缆墩受力工况较清晰, 波浪力和水流力较小, 控制荷载为系缆力。系缆墩基岩面顶高程约-28 m, 覆盖层完全以淤泥质粉质黏土为主, 若采用斜向打入桩作为基础, 则每根桩均须嵌岩处理, 否则桩基承载力无法满足受力要求; 若采用重力式方案, 则基床厚度偏大, 基槽开挖工程量较大, 在码头主体结构采用高桩梁板式结构的前提下, 重力式方案从施工方便性和经济角度均不合理。综合上述分析和本工程地质条件, 系缆墩采用高桩墩台结构, 墩台厚2.5 m, 下方布置4根直径2.0 m钢套筒嵌岩桩, 钢套管壁厚22 mm, 嵌岩段直径1.8 m, 长度为5 m, 桩基按照钢管混凝土桩进行计算, 考虑桩芯混凝土刚度。系缆墩设计方案见图1, 计算结果见表1。



a) 系缆墩平面布置



b) 系缆墩桩位布置

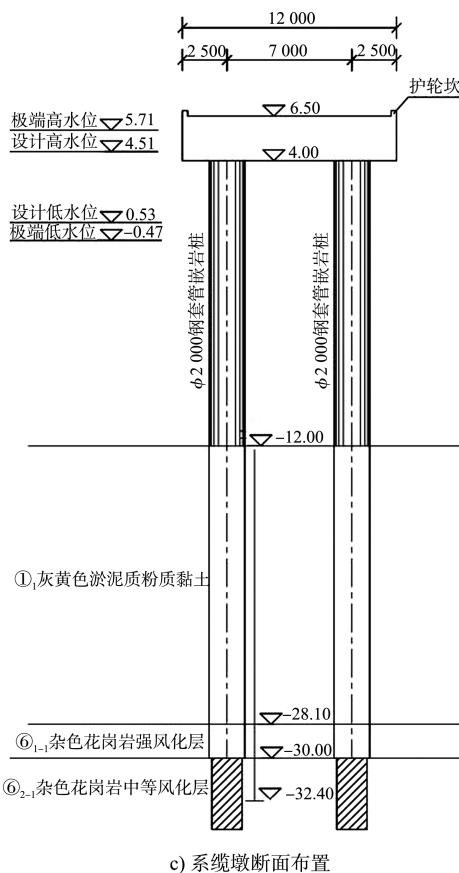


图 1 系缆墩设计方案 (高程: m; 尺寸: mm)

表 1 直径 2.0 m 钢套筒嵌岩桩系缆墩计算结果

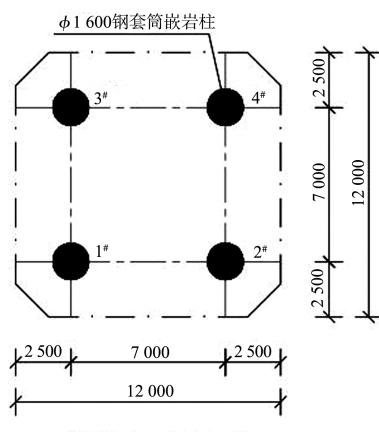
桩号	压桩力/kN	拉桩力/kN	桩弯矩/(kN·m)	水平位移/mm
1#	8 222	-	4 048	30
2#	4 638	-	8 522	
3#	5 244	-	3 975	
4#	4 369	-896	8 643	

从计算结果来看，系缆墩桩基内力和墩台位移均较合理，设计方案从安全性、使用性、耐久性和施工可行性等多方面均合理可行，造价也在可承受范围内，国内码头在相似前提条件下均采用该结构方案。但仔细分析计算结果，结构受力仍存在一个缺点，由于采用全直桩方案，当水平荷载较大时则须采用较大的桩径提高结构水平刚度，以减小结构整体的水平位移，大直径桩基的抗弯能力得到充分的发挥，但是由于桩尖采用嵌岩结构，轴向承载力常有较大富余。

若要同时发挥桩基的轴向承载力和抗弯能力，则需要在结构中间部位增加一道水平钢架，在相同水平力和桩径条件下，有水平钢架结构的位移明显小于无水平钢架结构，桩基的弯矩也更小。由桩基和多层钢架组成的钢结构在石油钻井海上平台和海上风电基础中采用较多，这就是熟知的导管架结构。

2 结构优化方案

根据以上分析，系缆墩的优化方向是在桩基中间部位增设水平钢架，以优化系缆墩桩基直径，使结构受力更合理，并节省工程投资。在这种思路的指导下，对系缆墩桩基直径和水平钢架的规格、位置进行多方案试算，根据试算结果，当系缆墩桩基直径为 1.6 m，钢套管壁厚 20 mm，水平钢架采用直径 1.4 m 钢管，高程为 -7.0 m 时，可达到原方案同样的设计使用要求。水平钢架可在桩基钢套筒沉桩完成后根据实际桩位进行工厂化制作，以确保制作精度和焊缝焊接质量等，水平钢架由 4 根直径 1.4 m 钢管组成，利用竖向直径 1.8 m 钢套管进行焊接连成整体，制作验收合格后运至现场，将直径 1.8 m 钢套管与直径 1.6 m 桩基钢套筒对齐，然后吊装向下至设定的高程进行固定。优化后的系缆墩方案如图 2 所示，计算结果见表 2。



a) 系缆墩优化桩位布置

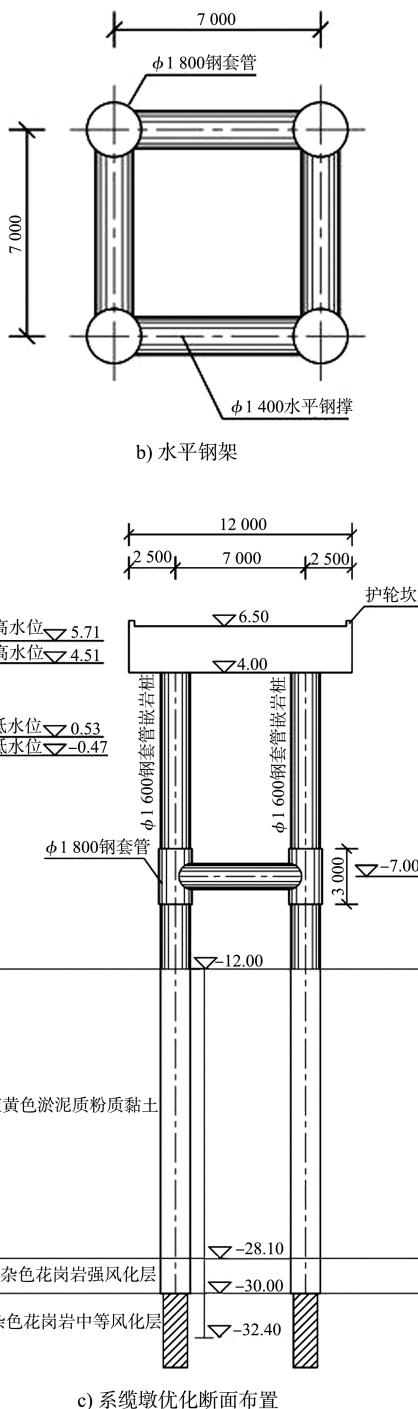


图2 系缆墩优化设计方案 (高程: m; 尺寸: mm)

表2 直径1.6 m钢套筒嵌岩桩系缆墩优化计算结果

桩号	压桩力/ kN	拉桩力/ kN	桩弯矩/ (kN·m)	水平 位移/mm	水平钢架 应力/MPa
1#	8 097	-	2 120		
2#	3 680	-	5 770		
3#	4 293	-	2 121	30	171
4#	3 473	-123	5 770		

根据计算结果: 系缆墩的水平位移与原设计相当, 桩基压桩力差异不大, 桩基最大拉桩力由896 kN减小至123 kN, 减幅显著, 桩基弯矩减小约32%, 水平钢架应力满足使用要求。根据本工程系缆墩桩基设计, 钢套筒嵌岩桩底部嵌岩段轴向承载力较高, 满足桩基抗压和抗拔受力要求。结构优化之后, 桩基弯矩大幅减小, 与桩基直径减小完全匹配, 最大拉桩力显著减小, 结构整体受力更趋于合理。

从工程投资角度, 优化之后, 含水平钢架在内的桩基钢套筒用钢量减小约16%, 混凝土用量减小约35%。除此以外, 钢套筒清孔、嵌岩和桩芯钢筋笼费用均可节省, 虽然水平钢架的施工费用较高, 但根据测算, 总体上桩基投资仍可节省约20%。

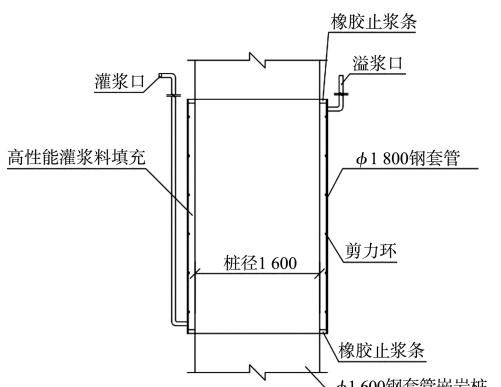
3 桩基-钢架连接方式

增设水平钢架后, 系缆墩的结构受力更合理, 造价更有优势, 但桩基与钢架如何进行连接的关键技术问题仍有待解决。由于连接节点位于水面以下, 传统上应用较多的现浇连接明显不适用, 若采用水下焊接, 则现场焊接的精度和质量不易保证; 焊缝应力集中导致结构可靠性不足; 焊缝区域的水下防腐处理十分困难。由于实施难度较大, 多层钢架结构在水运工程中仍较少采用。

通过对导管架技术的研究可发现, 导管架采用钢套筒压力灌浆技术进行节点连接, 具体做法是在导管架节点部位压力灌入高强灌浆料, 使节点有效传递轴力、剪力和弯矩。由于钢套管的约束作用, 在外部压力的作用下, 高强灌浆料在节点处密实度较高, 连接完成后, 两端钢结构有效连接为整体。该项技术在海上风力发电塔的导管架基础和海洋石油平台基础中广泛应用, 成熟可靠。本次桩基-钢架连接与导管架节点连接类似, 也可采用钢套筒压力灌浆技术进行连接。

桩基-钢架节点处受力大、内部空间小且位于水下，若采用钢套筒压力灌浆技术进行连接，对灌浆料的要求非常高，即灌浆料 1、28 d 强度不小于 55、120 MPa，与钢结构的连接强度不小于 6 MPa。除此以外，灌浆料还应具有大流动性、不泌水、抗离析性、抗水分散特性、高可泵性、高早强和超高强特性，并具备微膨胀特性、高抗疲劳和高耐久性等以适应节点的受力要求和特定环境下的施工要求。该类型灌浆料在国外如丹麦 DENSIT、德国 BASFU 和新加坡 NAUTIC 等公司均有生产；目前国内也有相关厂家研发并有成功应用案例，且国产灌浆料的价格也明显更低。

在优化设计研究中，水平钢架的钢套筒采用剪力环连接方式，具体做法是在灌浆套筒内壁焊接若干螺纹钢筋，灌浆套筒与桩基之间的连接空间小、封闭效果好，通过螺纹钢筋与灌浆料之间的机械咬合提高节点传力效果和抗剪承载力。水平钢架采用水下焊接牛腿或者吊装固定，安装就位后，潜水员下水在钢套管顶部和底部安装橡胶止浆条，形成密闭空间，钢套管底部设置进浆口，顶部设置出浆口，通过管道连通至水面，进浆口在水面操作平台通过泵送压力灌浆，逐渐排出钢套管密闭空间内的水体、气体等杂物，待出浆口处的样品收集合格后即可停止灌浆，出浆口处还应收集灌浆料样品，以便对灌浆料进行检测。水平钢架与桩基的每个节点均进行灌浆，达到固结的效果。



a) 侧视图

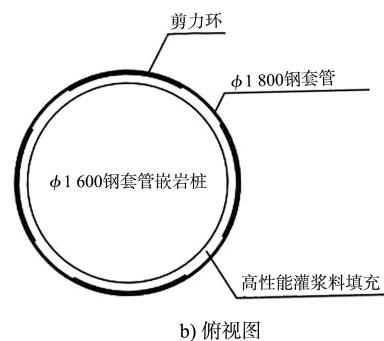


图 3 水平钢架与嵌岩桩固结 (单位: mm)

4 结语

1) 水平钢架与桩基之间可采用钢套筒内压力注浆进行水下固结，该技术在港口工程中可行，为应用导管架或多层钢架结构探索高桩码头新技术提供参考。

2) 对于离岸开敞码头全直桩系缆墩的设计，通过增设水平钢架的优化措施，可增加结构刚度、减小桩径、控制结构位移、充分发挥嵌岩桩的作用，该优化措施合理有效。

3) 在水平位移相差不大的情况下进行造价比选，含水平钢架的全直桩系缆结构经济优势明显，工程效益显著，在保证工程质量降低工程造价等方面有良好效果。

参考文献：

- [1] 陈廷国, 赵石峰, 丁永和, 等. 大型开敞式深水码头导管架结构设计研究[J]. 大连理工大学学报, 2010, 50(6): 963-968.
- [2] 杨国平, 周丰, 孙昭晨. 离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术[J]. 水运工程, 2011(11): 106-111.
- [3] 王建超, 贡金鑫. 轻型码头结构疲劳可靠性分析[J]. 水运工程, 2011(6): 77-80, 84.
- [4] 陈硕, 赵玉良, 董胜. 导管架型靠船墩的系统可靠性分析[J]. 工程力学, 2020, 37(S1): 340-346.
- [5] 戴邦国, 廖迎娣, 孙鹏, 等. 导管架靠船墩结构选型与影响因素分析[J]. 水运工程, 2018(10): 101-107.