



大管桩和PHC管桩在北方港口 码头工程中的应用前景

汪冬冬¹, 许礼雍², 王成启¹

(1. 中交上海三航科学研究院有限公司, 上海 200032;

2. 中交上海港湾工程设计研究院有限公司, 上海 200032)

摘要: 对大管桩和PHC管桩本体抗冻性、抗冰荷载性能, 北方港口码头使用大管桩和PHC管桩的辅助措施、总体技术方案以及技术经济性进行论证。研究认为: 只要控制好管桩混凝土本体的抗冻性, 对水位变动区和浪溅区管桩采取必要的防护措施, 并采用挡冰裙、挡浪板和钢筋混凝土胸墙等结构对暴露区段管桩进行防护, 大管桩和PHC管桩即可以在北方外海港口码头和桥梁工程中使用, 而且其技术经济优势明显, 具有良好的推广应用前景。

关键词: 大管桩; PHC管桩; 抗冻性; 挡冰裙; 挡浪板

中图分类号: U 655.55

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)01-0155-06

Application prospect of large cylinder pile and PHC pile in northern China seaport wharf project

WANG Dong-dong¹, XU Li-yong², WANG Cheng-qi¹

(1. CCCC Shanghai Third Harbor Engineering Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. CCCC Shanghai Third Harbor Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The freeze resistance and resistance to ice force of large cylinder pile and PHC pile, additional measures, overall technological scheme and technique-economics for the application of the above-mentioned two kinds of piles in northern seaport wharves are demonstrated. The results show that if the frost resistance of pile concrete is under control and necessary protective measures are taken for the pile in water level fluctuation area and splash zone, meanwhile the ice-retaining pile skirt, manger board and reinforced concrete parapet wall are used to protect the pile in the exposed area, large cylinder pile and PHC pile can be used in northern open seaport wharf. Moreover, the application prospect is extensive because of the obvious technological advancement and economic efficiency.

Key words: large cylinder pile; PHC pile; freeze resistance; ice-retaining pile skirt; manger board

大管桩和PHC管桩是港口码头工程中使用的主要桩型, 多年来广泛应用于我国华东、华南沿海港口码头与桥梁工程。2005年, 山东东营码头扩建工程成功采用大管桩^[1], 2009年, 河北黄骅港综合港区码头工程采用大管桩^[2], 2011年, 中交一航局三公司在长兴岛投资建厂生产PHC管桩, 产品在

大连、天津和东营的一些码头使用^[3]。总体而言, 大管桩和PHC管桩在北方港口码头的应用才刚刚起步。在有抗冻要求的北方地区, 预制混凝土管桩暂时不能被业主和设计单位广泛接受, 主要原因是普遍怀疑其抗冻性和抗冰荷载能力, 也有专家^[4]质疑大管桩接缝抗冻性。目前, 北方港口码头仍优先选

收稿日期: 2012-05-30

作者简介: 汪冬冬(1980—), 男, 高级工程师, 从事高性能混凝土、结构耐久性及预应力混凝土管桩研究。

用钢管桩作为基础，不仅前期投入成本较高，而且需要投入大量防腐成本。大管桩和PHC管桩耐久性好，大量检测资料^[5-8]表明，大管桩具有优越的力学性能、抗渗透性能以及对各种复杂地质的适应性。本文从技术和经济的角度综合分析大管桩和PHC管桩在北方港口码头工程中的应用前景。

1 大管桩和PHC管桩的抗冻性

本研究对3个大管桩预制厂和2个PHC管桩预制厂的管桩开展抗冻试验研究（表1）。表2是大管桩混凝土的抗冻试验研究结果，大管桩混凝土抗冻等级可达F350甚至F 1000以上。针对大管桩接头的抗冻性，专门开展接头抗冻性研究（图1），表2中B-JF是接缝抗冻试验结果，抗冻等级大于F350，抗冻指数90.8%，由此判断大管桩接缝

抗冻性好，不会成为冻融循环后的薄弱环节。表3是PHC管桩的抗冻试验研究结果，其中“一次蒸养”是针对“免压蒸”工艺，“二次蒸养”是针对“压蒸”工艺，根据研究结果，采用“压蒸”和“免压蒸”两种工艺生产PHC管桩的抗冻等级也均能达到F350甚至F1000以上。



图1 大管桩接缝抗冻试件B-JF制作

表1 大管桩、PHC管桩的抗冻试验

桩型	抗冻试件的制作方式	原材料与配合比	试验场地
大管桩	1. 留样混凝土同条件养护 2. 管节切割混凝土 3. 模拟大管桩接缝压力对接	5~25 mm连续级配碎石、中砂、P.O52.5水泥、P I 52.5水泥、S95矿粉、高效减水剂等	A，B，C共3个预制厂
PHC管桩	1. 留样混凝土标准养护 2. 留样混凝土一次蒸养 3. 留样混凝土二次蒸养 4. 压蒸PHC管节切割 5. 免压蒸PHC管节切割	5~25 mm连续级配碎石、中砂、P II 52.5水泥、S95矿粉、高效减水剂等	D，E共2个预制厂

注：留样混凝土一次蒸养是与免压蒸PHC桩同条件养护试块，二次蒸养是与压蒸PHC桩同条件养护试块。

表2 大管桩混凝土抗冻试验与结果

年份	编号	试块制作方式及混凝土配合比	抗冻等级	抗冻指数DF/%	抗冻性
2007	A-Z	A厂、管节切割、P.O52.5水泥、无掺合料	>F1000	97.0	好
2007	A-Z-A	A厂、管节切割、P.O52.5水泥、无掺合料、引气剂	>F350	97.0	好
2007	A-M	A厂、试摸、同条件、P.O52.5水泥、无掺合料	>F350	93.0	好
2008	B-JF	B厂、管节切割、拼接、P.O52.5水泥、无掺合料	>F350	90.8	好
2009	B-M	B厂、留样、同条件、P.O52.5水泥，无掺合料	>F300	94.5	好
2009	C1-1	C厂、留样、同条件、P I 52.5水泥+25%矿粉S95	F700	98.0	好
2010	C-LY	C厂、留样、同条件、P I 52.5水泥+25%矿粉S95	F850	99.0	好
2010	C-ZS	C厂、管节切割、P I 52.5水泥+25%矿粉S95	>F850	93.0	好

表3 PHC管桩混凝土抗冻试验结果

日期	编号	试块制作方式及混凝土配合比	抗冻等级	抗冻指数DF/%	抗冻性
2009-12	E-BY-M-09	留样，标准养护，P II 52.5水泥掺20%矿渣	>F800	100.0	好
2010-08	E-MYZ-M-10	留样，一次蒸养，P II 52.5水泥掺20%矿渣	>F400	80.0	好
2009-12	E-MYZ-Z-0912	桩身，一次蒸养，P II 52.5水泥掺20%矿渣	>F1000	99.0	好
2009-12	E-GZ-Z-0912	桩身，二次蒸养，P II 52.5水泥掺20%矿渣	>F850	94.0	好
2009-12	D-BY-M-09	留样，标准养护，P II 52.5水泥掺20%矿渣	>F800	100.0	好
2010-08	D-GY-M-10	留样，二次蒸养，P II 52.5水泥掺20%矿渣	F350	73.0	好
2010-08	D-GY-Z-10	桩身，二次蒸养，P II 52.5水泥掺20%矿渣	F600	90.0	好

为确保大管桩和PHC管桩良好的抗冻性,需要在生产和制作过程严格控制。首先,严格控制原料质量,包括优选水泥和矿物掺合料,选择品质优良级配良好的砂石料和优质的高效减水剂等。其次,优化管桩混凝土配合比,严格控制水胶比、砂率、坍落度等。再次,严格控制离心和蒸汽养护工艺参数(静停时间、升降温梯度、恒温温度及恒温时间等),并根据抗冻试验确定管桩抗冻等级。

混凝土质量是决定管桩抗冻性的关键因素。在配合比方面,大管桩和PHC管桩水胶比小于0.35,低水胶比有助于提高混凝土密实性和抗冻性。管桩混凝土砂率较低,良好的骨料级配有利于形成密实的混凝土结构。大管桩采用干硬性混凝土,混凝土强度等级C60,PHC管桩采用坍落度80~120 mm的塑性混凝土,强度等级C80。从抗冻性角度出发,一定要选用优质、稳定的原料。水泥、矿物掺合料、黄砂、碎石和外加剂等原料的各项技术指标必须严格控制。根据最新水泥标准GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》^[9]规定:

“普通硅酸盐水泥(P.O水泥)活性混合材掺量为5%~20%,其中允许不超过水泥质量8%的非活性混合材。”虽然限制了普通硅酸盐水泥中混合材掺量,但不限制混合材种类。已有研究^[10-11]表明掺入适量矿渣粉有助于提高混凝土抗冻性,但多数研究^[12-14]认为石灰石粉等对抗冻性不利。因此,对于有抗冻要求的管桩必须了解水泥种类,如果选用普通硅酸盐水泥则需了解混合材情况,并根据抗冻试验确定管桩混凝土抗冻性能。

大管桩和PHC管桩均采用离心工艺制作,但两者工艺有本质区别。大管桩采用“离心—振动—辊压”三复合工艺。合理的离心工艺参数是保证管桩混凝土结构密实的重要前提,是管桩生产企业在长期生产实践中不断总结出来的。而养护方式对管桩混凝土抗冻性影响更为显著。大管桩采用“先蒸汽养护后水养护”,PHC管桩广泛存在“压蒸”(先常压蒸养后高压蒸养)和“免压蒸”(只经常压蒸养后自然养护)2种工艺。虽然蒸养可能对抗冻性不利^[15-16],但只要严格控制生产环节,大管桩和PHC管桩可以达到较高的抗

冻性。对于蒸养的预制混凝土桩而言,合理的蒸养工艺参数和稳定的蒸养控制硬件设备是确保预制桩混凝土抗冻性的关键。静停时间过短、升降温梯度不合理、恒温温度过高等均可能对混凝土耐久性不利^[20]。因此,在有抗冻要求的混凝土桩的生产过程必须严格控制养护工艺参数。

2 大管桩和PHC管桩的抗冰凌荷载性能

2.1 冰荷载对桩基结构的影响

根据现行JTS144-1—2010《港口工程荷载规范》^[21]规定,作用在桩基结构上的水平冰荷载可以分为以下几种作用类型:1)冰排运动中被桩基结构连续挤碎或滞留在桩基结构前时产生的挤压力;2)孤立流冰块对桩基结构产生的撞击力;3)桩管内的水冻结后体积膨胀产生的作用于对管桩内壁的膨胀力。

2.2 冰排运动对桩基产生的挤压力

本文以大连STX船厂的舾装码头为例,取其码头前沿第1排 ϕ 800PHC(C型)进行使用期的桩基承载力分析。

2.2.1 挤压力计算

根据JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》^[18]第12.0.3条,冰排在直立桩前连续破碎时,产生的极限挤压冰力标准值按下列公式计算(海冰荷载计算参数的重现期取为50 a)。经计算,码头单桩所受的挤压冰力标准值为247.6 kN。

$$F_l = ImkBH\sigma_c \quad (1)$$

$$I = \sqrt{1 + 5H/B} \quad (1.0 < B/H \leq 6.0) \quad (2)$$

式中: F_l 为极限挤压冰力标准值(kN); I 为冰的局部挤压系数,计算值为1.723; m 为桩迎冰面形状系数,对于管桩取为0.9; k 为冰和桩之间的接触条件系数,取为0.32; B 为桩迎冰面投影宽度,取为0.8 m; H 为单层平整冰计算冰厚,结合规范及当地冰况,取为31.5 cm; σ_c 为冰的单轴抗压强度标准值,取为1 980 kPa。

2.2.2 桩身弯矩校核

假设码头使用期所受水平向冰荷载均由前沿第一排桩基承受且忽略上部结构传递的竖向荷载,采用ROBOT结构计算软件建立有限元模型计算桩身弯矩及相应的桩身应力。根据计算结果,承载能

力极限状态持久组合桩身弯矩为683.42 kN·m, 小于 ϕ 800 PHC (C型) 的极限弯矩1 238 kN·m; 正常使用极限状态准永久组合桩身最大拉应力为7.51 MPa, 小于桩身的混凝土有效预压应力10.34 MPa。具体计算见图2。

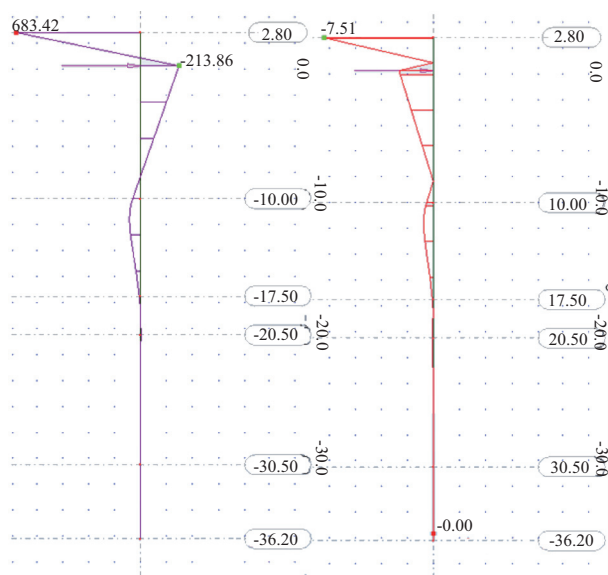


图2 冰荷载作用下的桩身弯矩和桩身应力

计算条件: 桩顶高程2.8 m, 桩长40 m, 泥面高程-10.0 m, 计算水位0.23 m;

计算模型: 采用 m 法计算, 认为桩基两端固结。

2.3 孤立流冰块对桩基结构产生的撞击力

现行JTS 144-1—2010^[18]并没有明确海港环境中孤立流冰对桩基的撞击力计算公式, 参考《海港设计手册》中公式(式3)计算, 码头单桩所受的流冰撞击标准值为231.5 kN, 小于相应的挤压冰力。由此可见, 通过相应的管桩选型、必要的防护措施或者冰况的人为控制, 均能减少流冰撞击对混凝土管桩的影响。

$$P_c = KV_b h \sqrt{\Omega} \quad (3)$$

式中: P_c 为流冰的撞击力(kN); K 为与冰极限抗压强度有关的系数, 取63 s·kN/m³; V_b 为流冰速度, 取1.0 m/s; h 为冰厚, 取30 cm; Ω 为流冰面积, 假定单桩受撞击的流冰面积为150 m²。

2.4 混凝土预制桩抵抗冰荷载性能

大管桩和PHC管桩的力学性能参数可根据管桩规程^[19]取值。在不同的设计环境下, 可以通过

相应结构设计以及管桩的合理选型来解决桩身承载能力的问题。而且天津、东营、大连等地码头使用情况足以证明, 北方冰冻港区选用混凝土管桩是完全可行的。

3 北方地区采用混凝土预制桩的辅助措施

3.1 桩身外包覆防护措施

玻璃钢是复合材料(FRP)^[20]具有较高的冲击强度, 适宜的热膨胀系数和较高的耐久性, 故可用于混凝土管桩外壁包覆(图3)。大管桩的接缝范围和PHC管桩接头一般采用外包玻璃钢。为提高耐久性和抗冻性, 可以根据需要对水位变动区和浪溅区管桩整段包覆。根据敲铲玻璃钢检查发现, 粘接力大于混凝土本体(图4)。由于冻融破坏是在有水环境发生, 玻璃钢包覆层防水特性可有效降低混凝土发生冻融侵蚀可能性(图5)。

3.2 混凝土预制桩防护的结构设计措施

3.2.1 桥墩结构采用挡冰裙防护

在北方港口码头的引桥采用混凝土管桩, 为了提高运营阶段的安全行, 可以从结构角度出发,



图3 大管桩接缝玻璃钢包覆

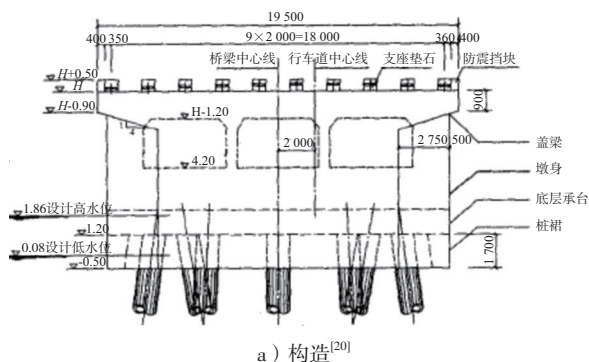


图4 包覆玻璃钢被敲铲后露出混凝土体



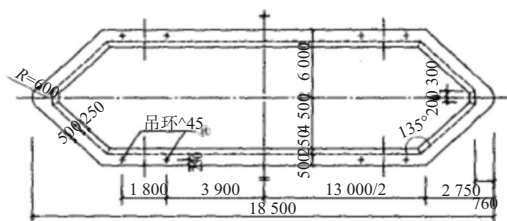
图5 水位变动区域玻璃钢包覆

设计挡冰裙防护结构, 对水位变动区暴露的混凝土桩进行保护。东营港码头扩建工程的引桥成功使用挡冰裙结构取得较好的工程效果^[20], 图6、图7分别是挡冰裙结构与施工及平、剖面图。通过设置挡冰裙, 使原本暴露的混凝土桩免受波浪、流冰以及漂浮物的冲击。因此, 设置挡冰裙可以作为抵抗冰凌荷载的有效措施。

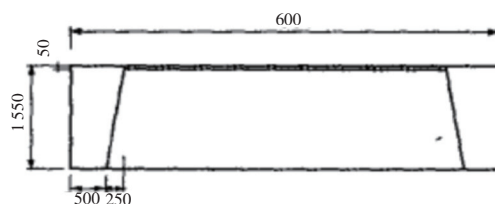
a) 构造^[20]

b) 施工情况

图6 挡冰裙结构与施工情况



a) 平面图



b) 剖面图

图7 挡冰裙的平面和剖面图^[20]

3.2.2 码头主体结构采用钢筋混凝土胸墙和挡浪板防护

对于码头的主体结构, 从设计的角度出发设计防护结构, 可以设置钢筋混凝土胸墙和挡浪板结构^[21]。图8是东营港码头后方承台断面。为防止管桩直接承受冰、风浪荷载, 挡浪结构下部采用预制钢筋混凝土遮帘, 属透空结构。钢筋混凝土胸墙和挡浪板覆盖整个水位变动区, 码头外侧利用钢筋混凝土胸墙和伸于水下的挡浪板挡浪、挡冰。挡浪板结构对混凝土桩起保护作用。因此, 在北方外海无掩护区域建设码头, 从抗冻的角度出发, 采用钢筋混凝土胸墙和挡浪板结构是行之有效的设计方案。

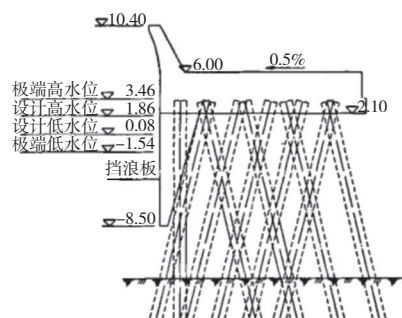


图8 码头后方承台断面

4 北方地区使用混凝土预制桩的综合技术方案

4.1 预制桩混凝土抗冻性控制

严格控制混凝土预制桩的制作过程, 包括原料、配合比、成型工艺、养护工艺等每个关键环节。针对具有抗冻要求的工程, 随桩一起制作同条件养护留样混凝土试件, 根据抗冻试验, 确定抗冻等级, 满足设计抗冻要求。为提高抗冻性, 需要采取优化配方, 使用矿物掺合料等技术措施。

4.2 码头结构采取综合辅助防护措施

为确保北方港口码头使用大管桩、PHC管桩和

方桩的安全性，需要采取综合的技术措施（表4）。首先，保证混凝土预制桩本体的抗冻性。其次，对施工期混凝土桩采取保护措施。再次，对水位变动区和浪溅区管桩采取桩身包覆措施。最后，从结构设计角度出发，引桥结构采用档冰裙结

构，码头主体结构采用挡浪板和钢筋混凝土胸墙防护。此外，从码头结构的整体设计角度出发，对于不便于采取挡冰裙、挡浪板的防护设计，可以在码头前排桩采用钢管桩，其他位置采用混凝土桩。

表4 北方港口码头使用大管桩和PHC管桩的综合技术措施

桩型	混凝土抗冻要求	施工期越冬措施	混凝土桩附加防护措施	结构设计措施
大管桩	满足设计要求	1.稳桩加固措施 2.桩芯防冻胀措施	1.接缝包覆FRP 2.水位变动区包覆FRP	1.桥梁结构设置档冰裙 2.码头结构设置挡浪板和胸墙防护
PHC管桩	满足设计要求	1.稳桩加固措施 2.桩芯防冻胀措施	1.水位变动区包覆FRP 2.钢接头防护	1.桥梁结构设置档冰裙 2.码头结构设置挡浪板和胸墙防护

5 结语

只要控制好管桩混凝土抗冻指标，从桩身防护角度出发对水位变动区和浪溅区对管桩包覆，并从结构设计角度出发采用挡冰裙、钢筋混凝土胸墙、挡浪板等结构对混凝土管桩进行保护，混凝土管桩可以在北方港口码头工程推广应用，具有良好的经济效益和社会效益。

参考文献：

[1] 刘锐. 预应力混凝土大直径管桩在北方港口工程中的应用实践[J]. 中国港湾建设, 2007(4): 58-61.

[2] 李书华. 黄骅港综合港区多用途码头工程大直径管桩施工工艺[J]. 水运工程, 2012(1): 183-186.

[3] 王永强, 刘军保, 孙义. 天津港东突堤北侧集装箱码头PHC管桩打桩应力试验研究[J]. 中国港湾建设, 2004(8): 42-44.

[4] 郭莲清. 天津港码头结构综述[J]. 港工技术, 2011(S12): 64-70.

[5] Richard K S. Performance of the raymond cylinder pile[J]. Foundation Facts, 1983 (13): 30-36.

[6] Berk N S, Hicks M C. Predicting chloride profiles in concrete[J]. Corrosion, 1994(3): 234-239.

[7] Carlsin J E. Chloride profile based on sampling of dust by hand drill with vacuum attachment[J]. Nordic Seminar in Lund, 1995(2): 1-2.

[8] Corrosion performance of concrete cylinder piles[R]. USA: FDOT, 2005.

[9] GB 175—2007 通用硅酸盐水泥[S].

[10] 杨荣俊, 隗功辉, 张春林, 等. 掺矿粉混凝土耐久性研究[J]. 混凝土, 2004(1): 38-41.

[11] 刘娟红, 宋少民. 粉煤灰和磨细矿渣对高强轻骨料混凝土涉及抗冻性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2005(4): 528-532.

[12] 何智海, 刘运华, 钱春香, 等. 双掺粉煤灰和石灰石粉对混凝土抗冻融性能的影响研究[J]. 新型建筑材料, 2010(2): 1-4.

[13] 袁航, 谢友均. 石灰石粉细度对混凝土性能的影响[J]. 粉煤灰, 2009(2): 13-15.

[14] 王稷良, 周明凯, 贺图升, 等. 石粉对机制砂混凝土抗渗透性和抗冻融性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(4): 482-486.

[15] 杨全兵. 蒸养混凝土的抗盐冻剥蚀性能[J]. 建筑材料学报, 2000(6): 113-116.

[16] 汪冬冬, 田伟丽, 王成启. 蒸汽养护及矿粉对混凝土力学性能、抗氯离子渗透性和抗冻性能影响研究[J]. 中国港湾建设, 2011(1): 23-26.

[17] 彭波, 胡曙光, 庆军, 等. 蒸养参数对高强混凝土抗氯离子渗透性能的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2007(5): 27-30.

[18] JTS 144-1—2010 港口工程荷载规范[S].

[19] JTS167-6—2011 港口工程后张法预应力混凝土大管桩设计与施工规程[S].

[20] 刘锐, 王海龙, 李积平. 带有挡冰桩裙的外海承台的施工[J]. 水运工程, 2008(4): 112-116.

[21] 刘锐, 韩永成. 外海无掩护码头镇南关挡浪板的计算与应用[J]. 水运工程, 2008(6): 72-75.

（ 本文编辑 郭雪珍 ）