

格形钢板桩码头结构加固改造方案研究

——广州港新沙港区 #2, #3 泊位码头前沿水域浚深方案设计

冯海波, 曾建辉

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司广州分公司, 广东 广州 511442)

摘要: 结合广州港新沙港区 #2, #3 泊位码头前沿停泊水域浚深方案设计, 从技术可行性、结构安全性以及改造方案的经济合理性和可操作性等方面入手, 对格形钢板桩码头结构加固改造的设计思路和方法进行了系统的分析与比对研究, 提出了一套关于格形钢板桩码头结构复核分析计算方法和改造加固方案, 供业内同行参考。

关键词: 格形钢板桩; 水域浚深; 码头结构; 加固改造

中图分类号: U 656.1+12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2010)06-0068-05

Structure strengthening and reconstruction scheme of cellular steel sheet pile wharf: wharf apron deepening dredging scheme design of berths #2 & #3 of Guangzhou Xinsha Port

FENG Hai-bo, ZENG Jian-hui

(Guangzhou Branch, CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Guangzhou 511442, China)

Abstract: Based on a systematic analysis and comparison of the design ideas and methods of strengthening and reconstruction of cellular steel sheet pile wharf structure from the feasibility of the technology, structural safety, as well as the reasonability of economy and operability of the reconstruction scheme combining the deepening dredging scheme design of berths #2 & #3 of Guangzhou Xinsha Port, we propose a set of analysis and calculation methods for the rechecking, strengthening and reconstruction scheme of cellular steel sheet piles.

Key words: cellular steel sheet pile; water area deepening dredging; wharf structure strengthening and reconstruction

广州港新沙港区 #1~#5 泊位建设规模均为 3.5 万吨级散货泊位, 是我国利用世界银行贷款按 FIDIC 条款建设的国家“七·五”重点工程, 也是我国首次采用格形钢板桩结构技术建造的岸壁式大型散货码头。于 20 世纪 90 年代初建成投产, 至今已近 20 年。

近年来, 随着码头装卸业务不断发展尤其是到港船舶越来越大型化的客观需要, 通过码头主体结构加固改造以改善和提高现有码头结构靠泊能力和泊位通过能力、改善港口作业条件、增强港口对不断变化的市场环境的适应能力和行业

竞争能力, 便成为全国各大港口尤其是老(旧)码头普遍的、必然的, 同时也是最经济、最快捷的途径。交通运输部“关于沿海港口码头结构加固改造有关事宜的通告”(2009 年第 4 号)对此提出了具体而严格的要求, 以进一步规范管理老(旧)码头结构加固改造工作。

广州港进港航道通航条件的不断改善尤其是航道二、三期疏浚工程的相继完成, 5 万~10 万吨级船舶已能在乘潮、减载等条件下安全到达各港区, 这为进一步挖掘各港区现有泊位码头的靠泊及装卸作业潜力提供了良好的通航条件。因此,

收稿日期: 2010-03-04

作者简介: 冯海波(1963—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程设计与咨询。

新沙港区也根据业务发展需要, 提出综合整改措施: 将 #2, #3 泊位前沿停泊水域底高程由原设计的-12.50 m 浚深至-13.50 m; 考虑 10 万吨级散货船舶的船舶荷载, 对码头主体结构从构造和承载能力等方面进行复核、验算; 并根据结构安全性验算需要, 采取相应的结构加固改造等工程措施, 以确保港池浚深后码头主体结构的整体稳定性和结构安全性能满足现行行业标准的规定和要求。

1 工程概况

广州港新沙港区 #1~#5 泊位码头前沿设计底高程-12.50 m (当地理论最低潮面, 下同), 码头面顶高程 4.4 m, 主体结构为直腹式格形钢板桩满堂式圆形格仓, 主格仓直径 21 m, 中心距 25 m, 副

格仓直径 8 m, 前板桩底高程-16.5 m, 后板桩底高程-14.50 m, 格仓内和格仓后回填砂, 格仓基础为换填密实中粗砂, 码头面为现浇混凝土大板结构, 参见码头格仓平面大样 (图 1) 和码头格仓墙体设计断面 (图 2)。

按照现行 JTJ 293—1998 《格形钢板桩码头设

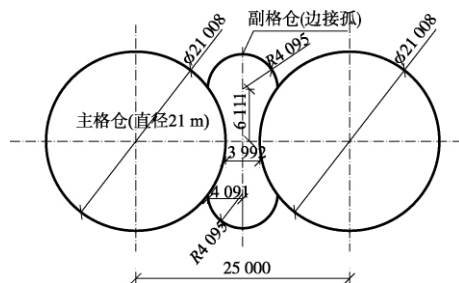


图 1 码头格仓平面大样

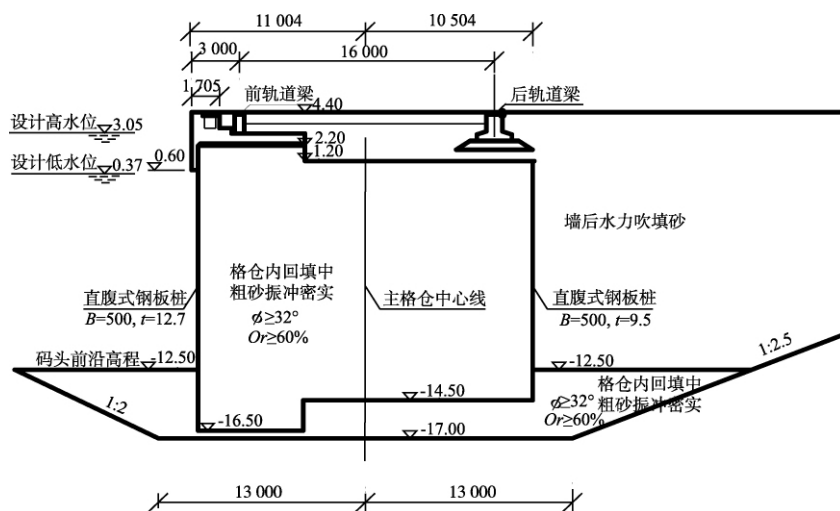


图 2 码头格仓墙体设计断面

计与施工规程》中关于“对于密实砂层地基, 前板桩入土深度不宜大于 3 m”以及“后板桩底高程应在码头前沿设计泥面高程以下 1~2 m”等关于格形钢板桩码头的结构构造设计原则, 考虑码头前沿停泊水域浚深 1.0 m 达到-13.5 m, 构造上满足规范要求, 技术上可行, 但最新勘察资料显示格仓墙后回填砂内摩擦角平均为 26° , 整体稳定性验算结果表明格形墙体抗剪切稳定性不满足现行规范要求, 需要采取适当的工程措施后才能对码头前沿水域进行浚深。

2 格形墙体抗剪切稳定性影响因素分析

2.1 影响因素分析及对策

根据 JTJ 293—1998 《格形钢板桩码头设计与

施工规程》^[1]有关规定, 格形钢板桩码头格形墙体抗剪切稳定性要求抵抗力矩与倾覆力矩满足一定关系, 即: 格仓填料和板桩锁口摩擦力对墙体计算底面处产生的抵抗力矩 M_r 与计算底面上墙体背后的荷载对墙体计算底面处产生的倾覆力矩 M_d 之间需满足如下关系:

$$M_r - M_d \geq 0$$

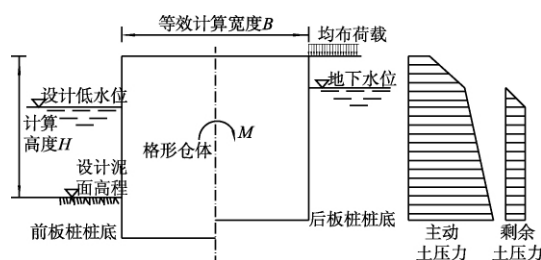


图 3 格形墙体抗剪切稳定性验算示意

从图 3 可见，影响格形墙体整体抗剪切稳定性的因素可归结为两大类：1) 提供格形墙体抵抗力矩的结构因素，包括格型钢板桩的锁扣质量以及格仓内回填料的抗剪切指标；2) 对格仓墙体产生倾覆力矩作用效应的“荷载作用”因素，包括格仓墙体后方回填料产生的主动土压力、剩余水压力、码头面荷载等。

于是，提高格形墙体结构抗剪切稳定性的主

要途径有二：一是加固改造格形墙体结构以提高其整体抵抗力矩，二是采取适当的工程措施降低格墙后外部作用水平进而降低其对格仓墙体所产生的倾覆力矩效应。

针对新沙港区 #2, #3 泊位码头前沿浚深 1.0 m 的使用要求，在不改变格型钢板桩本身结构前提下，欲提高墙体整体抗剪切稳定性，归纳起来有 6 种工程措施可供选择（表 1）。

表 1 提高墙体整体抗剪切稳定性的工程措施

序号	工程措施	主要特征
1	格仓内材料换填。即用抗剪切能力更强的块石部分或全部替换格仓内原有的回填料，以提高格形墙体本身的抗剪切能力。	需停产施工，需要大面积拆除格仓顶部结构以及部分固定设施，存在施工期格仓体的稳定性降低隐患。
2	格仓内材料改良加固。即对格仓内原有回填料直接进行改良处理（如水泥旋喷桩、水泥搅拌桩等），以提高格形墙体本身的抗剪切能力。	需停产施工；需要部分拆除格仓顶部结构以和固定设施；水泥搅拌桩方案需要大型施工机具，机架高，作业场地较大。
3	墙后部分填料换填。即用抗剪切能力更强的块石替换格仓后方一定范围内原有的回填料，以减小墙后主动土压力。	需停产施工，需要拆除格仓后方的输煤廊道以及其它码头面设施。
4	格仓后部分填料改良加固。即对格仓后一定范围内的回填料进行改良处理（如水泥旋喷桩、水泥搅拌桩等），以减小墙后主动土压力。	旋喷桩方案实施不需停产，施工机具小，作业场地小；搅拌桩方案需要大型施工机具，机架高，作业场地较大；需要分段拆除输煤廊道，需分段停产施工。
5	格仓后增设减压结构。即在格仓后方设置剪力墙（如水泥搅拌墙、灌注排桩、地连墙等），以减小墙后主动土压力对格仓墙体的直接作用。	需要大型施工机具，机架高，作业场地较大；需要分段停产施工。
6	降低码头面原设计荷载标准，即限载使用。	无具体结构加固或改造措施，限制码头荷载，极端情况下存在结构整体稳定性安全隐患。

以上措施中，措施 1 和 2 为直接提高格仓墙体结构本身的整体抗剪切能力以增强抵抗力矩，措施 3, 4, 5 主要是提高格仓墙体后方回填料的抗剪切能力以降低墙后的主动土压力作用效应进而降低倾覆力矩，措施 6 则是以降低码头使用条件来满足主体结构的稳定性要求。对于新沙港区 #2, #3 泊位前沿浚深方案，几种措施技术上都是可行的，但各有优缺点，具体采用哪种措施则需要根据工程具体情况，从技术可行性、结构安全性、经济合理性等方面分析比较，慎重选择。

2.2 工程措施的选用

根据广州港新沙港区 #2, #3 泊位码头实际运营情况和业主要求，码头前沿水域浚深和改善格仓墙体抗剪整体稳定性的工程措施需服从以下原则：

- 1) 码头前沿水域底高程从 -12.5 m 浚深到 -13.5 m；
- 2) 码头主体结构承载能力需按照现行行业规范和标准考虑 10 万吨级散货船的船舶荷载作用；

3) 不改变码头前沿线位置，不大规模改造码头主体结构即格型钢板桩结构本身；

4) 基本不停产，不影响码头面工艺设施的正常运行，对码头装卸作业影响最小。

综上，针对新沙港区 #2, #3 泊位前沿水域浚深要求，经技术经济比较后，选择采用格仓墙体后方局部范围内的回填料旋喷桩改良地基处理方案。

3 旋喷法改良地基处理方案^[2-8]

3.1 方案简述

根据以往的工程实际经验，结合本工程地基改良要求以及施工环境条件的局限性等因素，拟采用旋喷桩单桩加固直径为 1 500 mm，桩间距 1 500 mm，最大桩长 11.00 m，为了节省投资，在满足结构稳定性等安全需要的前提条件下，旋喷桩采用了梯级布置方式，详见图 4 所示。

3.2 改良处理后复合土体密度和内摩擦角的确定

- 1) 改良处理后复合土体密度 ρ 值的确定。

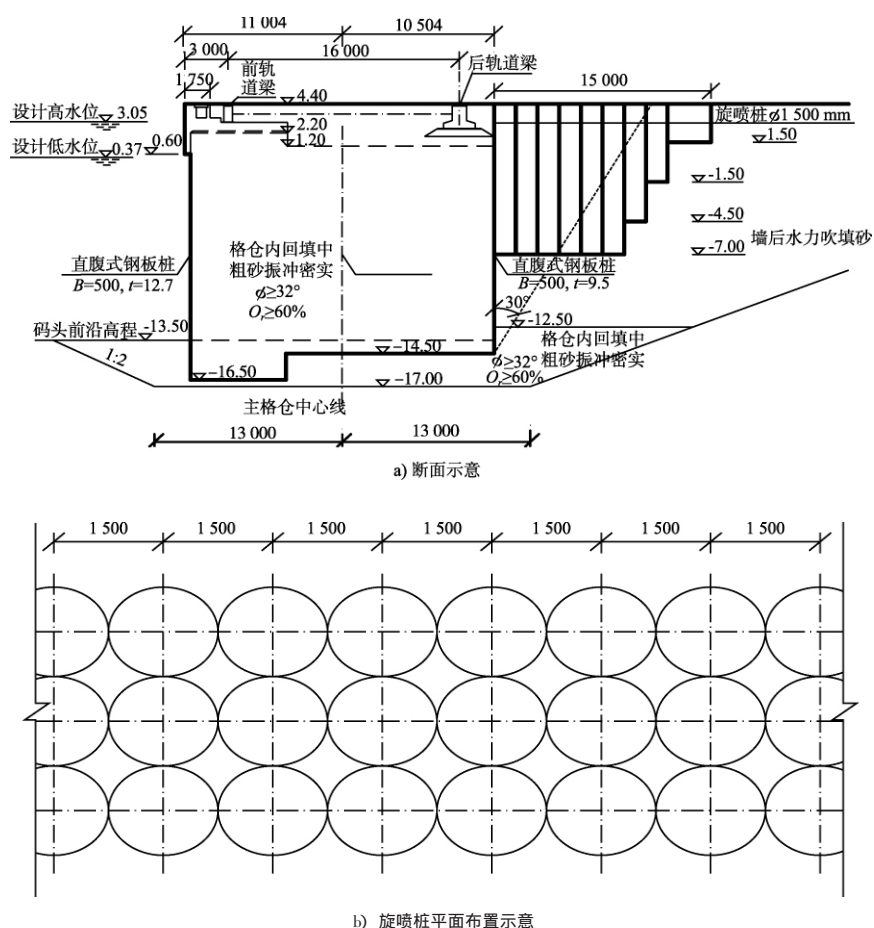


图 4 码头后方旋喷桩法改良地基处理断面及桩位布置

根据图 4 所示的旋喷桩布置方案, 改良土与原状回填砂面积比分别约为 75% 和 25%, 即格仓后改良处理部分土体的置换率为 75%。改良土体密度 ρ 按 2.0 g/cm^3 考虑。另外, 地质勘察资料揭示格墙后回填砂密度 ρ 为 1.8 g/cm^3 , 根据改良处理后改良土体对原土体的置换比例, 采用加权平均法计算得墙后回填砂改良后复合土体密度 ρ 约为 1.95 g/cm^3 , 用以验算格型墙体整体稳定性。

2) 改良处理后复合土体内摩擦角 ϕ 的确定。

高压喷浆加固土体与水泥搅拌法、注浆法等加固机理近似, 主要作用是提高土体承载力、减小沉降和差异沉降, 高压喷浆还应用于已有建筑物补强、纠偏等, 实际工程中加固土体以增加土体承载力为主, 故无侧限抗压强度静载试验资料较多, 而其土体的黏聚力、内摩擦角的试验成果及相关研究较少, 而确定改良加固土体 C, ϕ 值的资料偏少, 因此在地基整体稳定性分析中一般采用总强度的概念, 即总强度取 $1/10 \sim 1/15$ 无侧限抗压强度。

参考《地基处理手册》^[4]中关于旋喷桩法加固土体强度的有关统计资料, 采用三重管法对砂性土的加固强度一般可达 $2.0 \sim 15.0 \text{ MPa}$ 。根据工程实例调查, 在浙江宁波某工程中采用高压旋喷桩法工后实测桩体强度在 $1.46 \sim 3.01 \text{ MPa}$; 在华南某船坞工程中采用高压旋喷桩法工后实测桩体强度则在 $2.50 \sim 4.30 \text{ MPa}$ 。

结合本工程中格仓墙体整体稳定性对土体加固的实际需求以及所采用的旋喷桩改良处理方案的工程实际经验, 本次方案设计中旋喷桩强度要求达到 1.5 MPa 。

参照 JTJ 250—1998 《港口工程地基规范》^[2], 采用旋喷法、水上深层水泥搅拌法等工艺形成的复合土体其加固体抗剪强度为抗压强度的 $1/10$ 且 $\leq 0.2 \text{ MPa}$ 。作为改良加固工程, 考虑实施过程中的一些不可预见的影响因素, 在计算参数取值上宜考虑尽可能预留更大的富裕空间, 因此, 本方案设计中改良加固土体抗剪强度 C 按土体加固

强度1/15 考虑，加固体强度按 1.0 MPa 计算，即 $C=1/15 \text{ MPa}=66.7 \text{ kPa}$ 。

考虑加固处理后后方土体综合 C ， ϕ 值由加固体值与原土体值按置换率加权平均，其中加固体 ϕ 和原回填砂土体 C 值按 0 计算，上节计算已知加固复合土体密度 ρ 为 1.95 g/cm^3 ，计算结果如下：

加固后土体综合 C 值： $C=0.75 \times 66.70 \text{ kPa}=50.03 \text{ kPa}$

加固后土体综合 ϕ 值：

$$\phi=26^\circ \times 0.25=6.5^\circ$$

$$K_a=\tan(45^\circ-\frac{\phi}{2})^2=\tan(45^\circ-\frac{6.5^\circ}{2})^2=0.80$$

$$\sigma_a=\rho K_a-2C\sqrt{K_a}=30.10 \text{ kPa}$$

若加固后综合土体采用等代内摩擦角 $\phi \neq 0$ 时，则 $C=0$ ，依据相同土体对同一结构产生的主动土压力相等原则，即有以下关系：

$$\sigma_a=\sum \rho_i H_i K_a \text{ (其中 } \sum \rho_i H_i=151.1 \text{ kPa)}$$

$$\text{则 } K_a=0.20 \text{ 即得 } \phi=41.8^\circ$$

综合以上分析计算，同时考虑施工可靠度及保证结构安全度，改良处理后复合土体综合内摩擦角按 $\phi=40^\circ$ 、密度 ρ 按 1.95 g/cm^3 考虑。

根据上述确定改良后复合地基土力学指标，按 JTJ293—1998 《格形钢板桩码头设计与施工规程》^[1] 有关规定，经过分析验算，自格型钢板桩后沿往后 15 m 范围内回填砂进行改良地基处理并满足上述技术指标要求再进行前沿水域的浚深施工，格形墙体的抗剪、抗倾、抗滑、整体稳定性以及钢板桩环向抗拉强度等均满足规范中相应的要求。

4 结语

格形钢板桩码头在我国工程实例少，设计、施工以及使用经验均不丰富，加固改造方案设计必须满足现行设计规范、规程的相关规定和要求，同时，应合理采用相对比较成熟的有一定工程实践经验的新技术、新材料、新工艺，提出安全可靠、经济合理、实施方便快捷、对码头营运影响尽可能小的结构加固改造方案。

本文在对以往工程经验的总结与归纳基础上，充分考虑了码头主体结构现状以及业主要求，针对格型钢板桩码头前沿水域浚深 1.0 m 的改造目

标，提出了格仓后一定范围内回填砂水泥旋喷桩法改良加固处理方案，并对改良加固后的复合地基土力学指标计算取值方法从理论和实际工程经验上进行了比对分析。整个工程方案的实施基本不需要停产，不拆除现有工艺设备设施、对码头面破坏最少、易于修复，符合结构安全可靠、满足使用要求、工程措施经济合理、实施方便快捷等改造的基本原则和要求。

同时，通过以上方案设计过程中的调查研究，对老（旧）码头结构加固改造设计工作有如下几点体会，值得业内人士在遇到类似问题时参考。

1) 须深刻理解并贯彻交通运输部 2009 年第 4 号文有关要求的精神实质，严格区分与“码头靠泊能力核查论证”工作内容和工作重点之间的区别；

2) 必须全面了解掌握码头原设计标准、建设和使用前提条件、建成投产营运状况、主体结构各构件承载能力和耐久性现状、码头面装卸设备尤其是固定设备设施状态；

3) 根据码头结构加固改造目标，按现行行业规范和有关标准复核码头主体结构的安全性并在此基础上提出码头结构加固改造方案的同时，还需对码头水域作业环境、装卸工艺、消防与环境保护等配套设施做出有针对性的适应性评估，并提出相应的合理化建议。

参考文献：

- [1] JTJ 293—1998 格形钢板桩码头设计与施工规程[S].
- [2] JTJ 250—1998 港口工程地基规范[S].
- [3] DBJ 15—38—2005 建筑地基处理技术规范[S].
- [4] 龚晓楠. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [5] 任根洪. 高压双管旋喷桩注浆技术在中船龙穴造船基地民船区造船坞围堰中的应用[J]. 广东科技, 2009(6): 203-204.
- [6] 蔡红星, 范建明. 高压旋喷桩在浙江某码头后方软基处理中的应用[J]. 水运工程, 2007(4): 74-77.
- [7] 董兆松. 高压旋喷桩施工技术[J]. 公路与汽运, 2007(5): 166-168.
- [8] 苏弦. 高压旋喷桩复合地基的设计与施工[C]//第二届全国岩土与工程学术大会论文集(下册). 北京: 科学出版社, 2006: 545-550.

(本文编辑 武亚庆)