



软土地基上板桩码头结构方案研究

苏 超¹, 魏琳帆¹, 盛鹏程¹, 张杨杨²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 上海市水利工程集团有限公司, 上海 200237)

摘要:以某软土地基上的板桩码头工程为例, 采用地下连续墙作前墙、混凝土梁连接前后桩基的设计方案。考虑到软土地基的材料非线性, 地基土体采用邓肯-张模型, 并使用有限单元法分析板桩码头各构件的应力分布规律和变形特点。另外, 采用多种方案对比的方法对码头结构设计方案中的前墙入土深度和两排 PHC 桩基的桩长进行研究。分析前墙入土深度和 PHC 桩长对板桩码头位移和内力的影响, 并给出前墙入土深度和 PHC 桩长的优化结果, 为工程实践中板桩码头的结构优化设计提供依据。

关键词:板桩码头; 软土地基; 有限单元法; 邓肯-张模型; 结构设计

中图分类号: U 656.1⁺12

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)08-0041-05

Structural scheme of sheet pile wharf on soft soil foundation

SU Chao¹, WEI Lin-fan¹, SHENG Peng-cheng¹, ZHANG Yang-yang²

(1.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2.Shanghai Water Conservancy Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 200237, China)

Abstract: Taking the sheet pile wharf project on soft soil foundation for example, we propose the sheet pile wharf design scheme using underground continuous wall as the front wall and concrete beams to connect the front and rear as a whole is proposed. Considering the material nonlinearity of the soft soil foundation, foundation soil adopts Duncan-Chang model. The sheet pile wharf stress distribution and deformation characteristics are analyzed by the finite element method. Moreover, front wall buried depth and the length of prestressed high strength concrete pile belonging to structure design scheme of the sheet pile wharf is researched. Different front wall buried depth and prestressed high strength concrete pile length can impact the sheet pile wharf stress and displacement. By analyzing the impact, the optimization result of front wall buried depth and prestressed high strength concrete pile length can be decided. Those results provide the basis of sheet pile wharf structure optimization in engineering practice.

Keywords: sheet pile wharf; soft soil foundation; finite element method; Duncan-Chang model; structure design

有限单元法可以有效地模拟各种码头结构形式、布置方案和约束条件, 适用于各种形式的板桩码头结构应力、应变和整体稳定分析^[1-4]。刘文平等^[5]对遮帘式板桩码头结构进行了有限元分析;

蔡正银等^[6]对卸荷式板桩码头进行了有限元数值分析。本文采用有限单元法分析软土地基上板桩码头的受力和变形特点。新的码头结构形式——桩基地连墙组合结构, 即地连墙代替板桩与横梁

收稿日期: 2016-03-31

作者简介: 苏超 (1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事水工结构工程、水运工程数值计算方法与实验研究。

相连形成桩基排架，具有抵抗侧向压力能力较好和防渗的特点，可有效适应软土压缩性高、透水性差、天然含水量大及强度低的特点^[7-8]。而何良德等^[9-10]在对新型桩基地连墙组合结构的有限元分析中，对于软土地基采用摩尔-库伦的线弹性模型。邓肯-张双曲线模型可以反映软土自加荷一开始便存在的显著非线性，广泛应用于土石坝及各种地基沉降计算^[11-12]，但在码头地基上的应用研究相对较少。本文考虑软土地基的材料非线性采用邓肯-张的 $E-B$ 模型，利用 UMAT 子程序对 ABAQUS 实现二次开发^[13]，分析板桩码头各构件的应力和变形特点。同时还对该板桩码头结构设计方案中的前墙入土深度和 PHC 桩基的桩长进行研究并得出优化结果。

1 工程概况

某码头工程拟采用板桩结构，前墙为地下连续墙结构，在前墙后采用圆形截面 PHC(预应力高强混凝土)桩基支承上部轨道梁。码头前沿港池内设计高水位为 3.14 m，设计低水位为-0.43 m，前沿港池底高程(黄海高程)-7.2 m，码头面高程 5.3 m。地连墙厚 1.0 m，两排轨道梁下分别有顺港池向间距 4.5 m 的打入式 PHC 桩，桩径 0.8 m，两排轨道梁间距 10.5 m。前墙与第 1 排轨道梁形成整体，再与第 2 排轨道梁通过设置混凝土梁连接在一起，即混凝土梁连接前后整体，形成整体排架结构。前墙底高程-24.0 m，桩基底高程-24.2 m，桩端持力层为地基粉细砂层(图 1)。

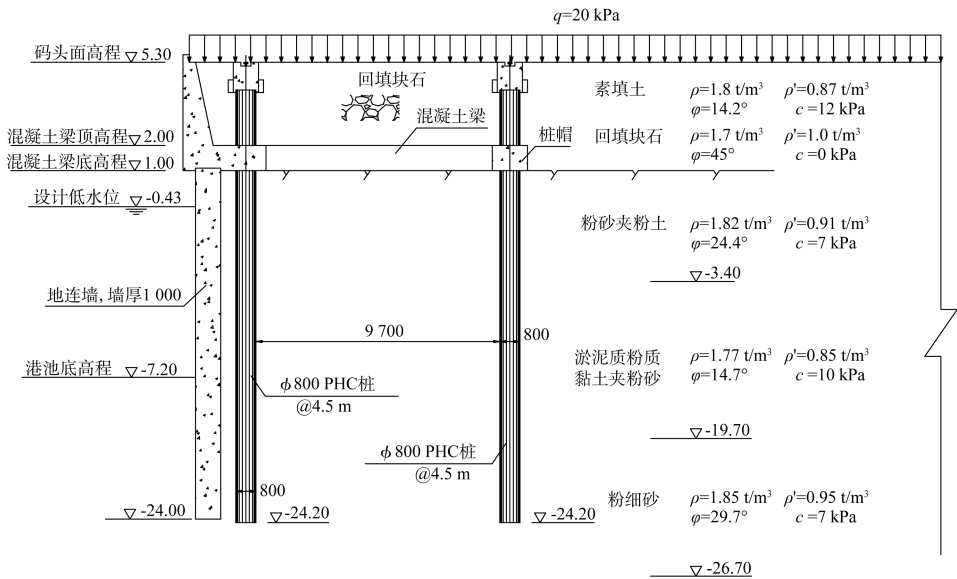


图 1 码头剖面 (高程: m; 尺寸: mm)

2 计算模型和计算条件

2.1 计算模型

计算模型的范围从第 2 排轨道梁向码头岸上取 2 倍轨距，从地连墙向港池侧取 15 m，沿桩底向下延伸 1 倍桩基高度。模型坐标原点位于胸墙左下角(黄海高程 1 m)，坐标系 X 轴正向为指向海侧方向， Y 轴沿码头沿线， Z 轴正向竖直向上。码头-地基整体结构的计算模型划分为 66 680 个单元、72 332 个结点。模型边界条件取为侧面对称约束，底部固定支座，采用固定约束(图 2)。

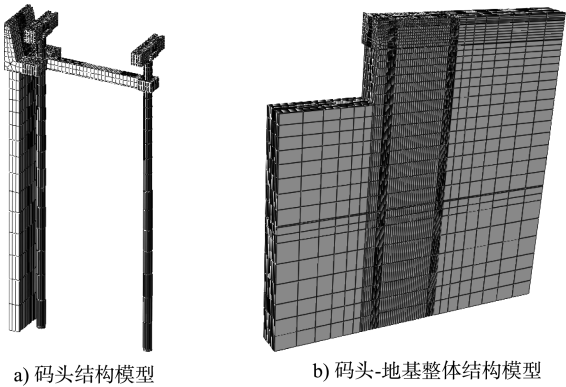


图 2 结构三维网格模型

2.2 材料参数和计算工况

软土地基依据压缩模量近似分为 2 类, 素填土、粉砂夹粉土、淤泥质粉质黏土夹粉砂为土 1, 粉细砂取为土 2, 各类参数取其平均值。混凝土、上部回填块石和地基土体所采用的物理力学材料参数如表 1 所示。土体采用邓肯-张的 $E-B$ 模型计

算时, 所需的计算参数如表 2 所示。

表 1 码头工程材料参数

材料	$\rho/(t/m^3)$	$\rho_{sat}/(t/m^3)$	E/MPa	μ
上部回填块石	1.70	2.00	20 000	0.17
土 1	1.80	1.87	23.2	0.25
土 2	1.86	1.94	52.0	0.25

表 2 土体邓肯-张的 $E-B$ 模型材料参数

材料	K	n	R_f	C/Pa	$\varphi/(^\circ)$	$\Delta\varphi/(^\circ)$	K_b	m	K_{ur}	P/Pa
土 1	207.9	0.55	0.593	12.0	16.2	0	321.22	0.79	344.6	100
土 2	315.5	0.92	0.613	6.5	30.0	0	251.01	0.75	520.0	100

本文计算选取最危险工况, 即低水位期(设计低水位-0.43 m), 此时作用在地下连续墙港池侧的水压力较小, 在墙后土压力等作用下, 前墙稳定处于不利状态。

3 板桩码头有限元分析

在 ABAQUS 用户自定义材料二次开发中, 利用 UMAT 子程序编写邓肯 $E-B$ 模型程序, 应力积分采用带误差控制的改进 Euler 积分算法。在 ABAQUS 有限元计算中, 先进行地应力平衡, 施加重力荷载获得初始应力状态, 再进行码头结构计算, 导入算出的初始应力, 提交 JOB 时再导入包含 UMAT 子程序的 FORTRAN 文件至 user subroutine file, 计算码头-地基整体结构模型在低水位期外荷载作用下的应力和变形, 成果分析如下。文中所提应力如无特殊说明均以拉为正、以压为负, 铅直(竖)向位移向上为正, 横港池向位移以指向海侧为正。

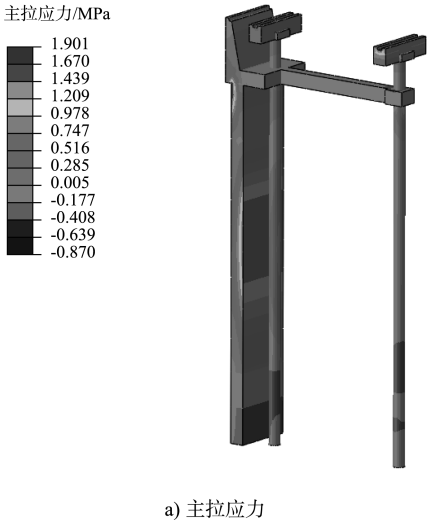
3.1 位移分析

在低水位期由于自重、水压力、地面荷载、门机荷载及系缆力等作用下, 码头-地基整体结构模型的竖向位移最大为 8.93 cm, 发生在开挖的港池处, 整体模型竖向位移规律大致符合土体沉降分层的规律; 横港池向水平位移最大为 1.648 cm, 大部分水平位移偏向海侧。码头结构竖向位移最大

为 3.869 cm; 横港池向水平位移最大值为 1.592 cm, 指向海侧, 发生在地下连续墙顶端。地下连续墙横港池向水平位移指向海侧, 呈现从上到下逐渐减小的趋势。

3.2 应力分析

图 3 为码头结构有限元计算所得的应力极值云图。从图 3 可以看出, 码头结构总体处于压应力或较小的拉应力状态, 最大主拉应力为 1.901 MPa, 发生在地下连续墙顶部, 该区域有一定程度的主拉应力集中现象。此外, 在地连墙中部偏下位置有较大主拉应力, 数值为 1.400 MPa。码头结构主压应力最大值为 8.603 MPa, 发生在混凝土梁与岸侧第 2 排桩的连接处附近下表面。在混凝土梁与第 1 排桩连接桩周岸侧位置也有小范围的主压应力集中, 数值为 3.680 MPa。



a) 主拉应力

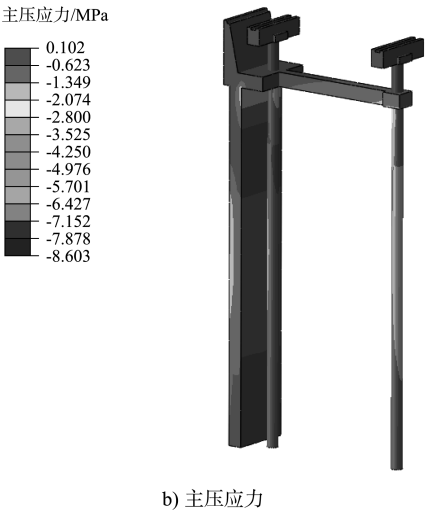


图 3 板桩码头有限元计算的应力云图

4 结构设计方案

影响板桩码头位移和内力的因素主要包括：前墙入土深度、前墙刚度、混凝土梁布置方案、PHC 桩基的桩长以及土体性质等。本文采用方案对比的方法，分析前墙入土深度和 2 排 PHC 桩基的桩长对板桩码头结构内力和位移的影响并给出较优的结果。

4.1 不同前墙入土深度有限元结果分析

分别选取 4 种不同前墙入土深度(前墙入土深度分别为 22.8、16.8、11.8 和 7.3 m)进行有限元分析计算，找出码头结构位移及应力随其变化的趋势，确定前墙入土深度方案。

不同前墙入土深度有限元计算结果对比见表 3。

表 3 不同前墙入土深度有限元计算结果

方案	前墙底 高程/m	入土 深度/m	前墙 高度/m	前墙横港池 向水平位移 极值/mm	码头主 拉应力/ MPa	码头主 压应力/ MPa
1	-30.0	22.8	31.0	14.92	1.875	7.832
2	-24.0	16.8	25.0	15.92	1.901	8.603
3	-19.0	11.8	20.0	17.98	1.940	7.936
4	-14.5	7.3	15.5	21.29	3.195	6.173

从表 3 可以看出，码头结构最大主拉应力随入土深度的增加逐渐减小。最大主拉应力极值发生在方案 1~3 中均为地下连续墙顶部，方案 4 中为第一排桩中下部位位置。码头结构最大主压应力

随前墙入土深度变化未见明显变化规律。

前墙横港池向水平位移极值与前墙入土深度关系曲线见图 4。

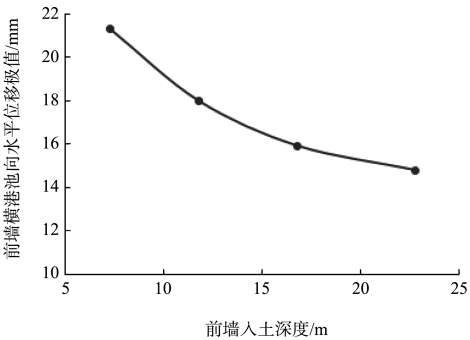


图 4 前墙入土深度-前墙横港池向水平位移极值关系曲线

从图 4 可以看出，随着前墙入土深度的增加，前墙横港池向水平位移极值逐渐减小。考虑结构应力要求，以结构最大主拉应力不超过混凝土抗拉强度为控制标准，C30 混凝土的抗拉强度标准值为 2.01 MPa，方案 1、4 已超出规定要求。此外，方案 1 中前墙底端已进入粉质黏土夹粉砂土层，土体软弱，同时在地下连续墙达到一定深度时，工程造价及施工方面处于劣势。方案 3 前墙水平位移相比方案 2 较大。该工程初始设计方案即方案 2 中前墙水平位移较小，极值 15.92 mm，主拉应力极值 1.901 MPa，且前墙底端在粉细砂层内，土层性质较好，故推荐前墙底高程为-24 m 方案作为选择结果。

4.2 不同桩长设计方案有限元结果分析

在该码头工程初步设计方案中，两排轨道梁下分别有间距 4.5 m 的打入式 PHC 桩，桩基底高程-24.2 m，桩端持力层为第 4 层地基粉细砂层。该粉细砂土层为中低压缩性、中等强度土，颗粒级配良好，工程性质好。现调整 2 排 $\phi 800$ mm 桩基底部高程，分别选取 6 种不同桩基底面高程情况(底高程分别为-16.7、-19.0、-21.4、-24.2、-25.5和-26.7 m)进行有限元分析计算，找出位移及应力随其变化的趋势，确定最佳桩长。

不同桩长设计方案有限元计算结果对比见表 4，表中桩长自胸墙底部 1 m 处向下算起。

表 4 不同桩长设计方案有限元计算结果对比

方案	桩基底 高程/m	桩长/m	前墙横港池向 水平位移极值/mm	码头主拉 应力/MPa	码头主压 应力/MPa	第 1 排轨道梁 沉降极值/cm	第 2 排轨道梁 沉降极值/cm	2 排轨道梁 沉降差/mm
1	-16.7	17.7	15.06	1.671	7.182	3.833	3.073	7.60
2	-19.0	20.0	15.18	1.730	7.745	3.815	3.046	7.69
3	-21.4	22.4	15.40	1.806	8.249	3.785	3.006	7.79
4	-24.2	25.2	15.92	1.901	8.603	3.734	2.944	7.90
5	-25.5	26.5	16.28	1.953	8.697	3.697	2.903	7.94
6	-26.7	27.7	16.57	2.017	8.745	3.645	2.849	7.96

从表 4 可以看出,随着轨道梁下 2 排 PHC 桩基底高程逐渐降低,桩长度逐渐增加,前墙横港池向水平位移极值均发生在地下连续墙顶部位置,位移极值大小逐渐增加,但总体变幅不大。不同桩长设计方案下,码头结构主拉应力极值均发生在地下连续墙顶部,码头结构主压应力极值均发生在混凝土梁与第 2 排桩连接处桩周靠港池侧下表面,且两者极值均随着桩长增加而逐渐增加。并且 2 排轨道梁的沉降极值随着 PHC 桩长增加而逐渐减小。桩基上的 2 排轨道梁存在不均匀沉降,但各方案的沉降差都保持在 7~8 mm,对轨道上的正常运行影响不大。方案 6 中桩基底高程即为粉细砂层底部,其下土层工程性质较弱,故不宜将桩基深入其下。可见,桩长对地下连续墙水平位移的影响不及前墙入土深度的影响,而且桩长变化对 2 排桩基水平位移影响较小。综合考虑应力和位移因素,且桩端持力层位于粉细砂层(-19.7~-26.7 m)中有利于桩基整体稳定性,再结合工程造价与施工方便,将桩基底部高程设为方案 3,即桩基底高程为 21.4 m。

5 结论

- 1) 前墙横港池向水平位移极值随着前墙入土深度的增加逐渐减小。码头结构最大主拉应力随入土深度的增加逐渐减小。
- 2) 桩长对地下连续墙水平位移的影响不及前墙入土深度的影响,而且桩长变化对两排桩基水平位移影响较小。随着轨道梁下 2 排 PHC 桩基底高程逐渐降低,桩长度逐渐增加,前墙横港池向水平位移极值逐渐增加,但总体变幅不大。而码头结构的主拉应力极值和主压应力极值随着桩长

增加而逐渐增加。并且 2 排轨道梁的沉降极值随着 PHC 桩长增加而逐渐减小。

参考文献:

[1] 李景林,王剑平,蔡正银,等.遮帘桩方案改造板桩码头离心模型试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(8):978-982.

[2] 冠辰,蔡正银,李小梅,等.遮帘式板桩码头工作机理初探[J].岩土工程学报,2012,15(4):762-766.

[3] 刘延致.分离卸荷式板桩码头结构受力分析及优化研究[D].青岛:中国海洋大学,2012.

[4] 孙楠.大型深水板桩码头断面及计算方法研究[D].天津:天津大学,2009.

[5] 刘文平,郑颖人,蔡正银,等.遮帘式板桩码头结构有限元分析[J].岩土工程学报,2010(4):573-577.

[6] 蔡正银,侯伟,周健,等.20 万吨级卸荷式板桩码头数值分析[J].岩土工程学报,2015(2):218-224.

[7] 刘永绣.板桩和地下墙码头的设计理论和方法[M].北京:人民交通出版社,2006.

[8] 中华人民共和国行业标准.板桩码头设计与施工规范[S].北京:人民交通出版社,2009.

[9] 胡家顺,李新国,卢昭.桩基地连墙码头结构新形式应用与研究[J].水运工程,2011(9):165-169.

[10] 何良德,杨艺平,胡家顺,等.T 型桩基地连墙组合式码头结构受力特性研究[J].水道港口,2012,33(6):523-531.

[11] 王志亮,宋茂天,殷宗泽.路堤沉降计算中邓肯-张模型参数灵敏度分析[J].岩土力学,2004,25(7):1135-1138.

[12] 李宏恩,李同春,田景元,等.改进的邓肯-张模型在大坝应力应变分析中的应用[J].水电能源科学,2010,28(3):63-65.

[13] 费康,张建伟.ABAQUS 在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.