

遮帘式板桩码头结构有限元分析

刘文平¹, 郑颖人¹, 蔡正银², 焦志斌²

(1. 后勤工程学院军事建筑工程系, 重庆 400041; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要: 目前国内码头结构形式多为板桩墙, 受墙身高度限制, 只适用于中小码头建造。遮帘式板桩结构, 在前墙后加入一排桩, 极大改善了前墙受力, 使码头泊位向大型深水化提供了可能。该结构无成熟的设计方法, 为了更准确的设计及改造已有码头, 需对常规设计方法进行验证。结合京唐港#32码头遮帘桩工程, 采用 ANSYS 对其进行数值模拟。计算表明, 在正常设计工况下, 加桩后前墙弯矩减少了约 70%, 负弯矩减少了约 10%。加遮帘桩前后, 后墙受力变化不大。数值计算与监测结果基本吻合, 证明遮帘桩是一种可行的支护方式。

关键词: 遮帘桩; 有限元; 监测

中图分类号: TU472 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)04-0573-05

作者简介: 刘文平(1979-), 男, 山西右玉人, 博士研究生, 从事岩土工程稳定性相关研究。E-mail: lww98121@163.com。

Finite element method for covered sheet pile wharfs

LIU Wen-ping¹, ZHENG Ying-ren¹, CAI Zheng-yin², JIAO Zhi-bin

(1. Dept. of Civil Eng., Logistical Engineering University, Chongqing 400041, China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: The most structures of wharfs in China are in the form of sheet pile walls. The height restriction of walls is only suitable for construction of small and medium-sized terminals. The covered sheet pile structure, adding a row of piles after the front wall, has greatly improved the force of the front wall. As a result, the covered sheet pile structure makes it possible to develop large scale deep water wharfs. The structure has no mature design. In order to better design and reconstruct wharfs, the conventional methods should be verified. The covered sheet pile project of wharf #32 of Jingtang Port is taken as a case, and numerical simulation is performed by use of ANSYS. The results show that under normal conditions of the design, after adding piles, the moments of the front wall are reduced by about 70%, and the negative moments about 10%. The force of the back wall does not change after adding covered sheet pile structure. Numerical results coincide with the monitoring data, indicating that the covered sheet piles are a feasible support way.

Key words: covered sheet pile; finite element method; monitoring

0 引言

建国 50 年来, 据不完全统计, 建设板桩码头近 300 个泊位, 但其中 85% 的属于小型码头。随着我国经济的迅猛发展, 这些小型码头由于现有泊位前沿水深较浅, 无法靠泊大型船舶, 严重影响了经济效益。绝大多数码头地理位置优越, 加之新建码头要花费更多的费用和时间, 因此在尽可能少的对原有设施不进行改动的前提下, 采用经济合理的方法对这些码头进行改造成为亟待解决的问题。同时在国内新建的码头中其结构多为板桩墙, 常见的板桩墙的墙身总高度不超过 18~20 m, 板桩码头结构主要在中小型码头泊位中使用。为了突破板桩墙结构型式在码头建设中应用的局限性, 经过多年对板桩墙码头结构设计实践和探

索, 中交第一航务工程勘察设计院新近提出了一种遮帘式板桩结构, 可作为大型深水泊位的码头结构。

普通板桩码头的前沿板桩墙, 要有较大的抗弯刚度, 而增加抗弯刚度一般是通过增大板桩墙的截面积来实现。截面积越大, 刚度也越大, 结果使板桩在作用时的端部锚固形式更为不利, 土压力全部由墙面承担, 结构物的主动区段减小, 填土不能与结构结合起来共同作用。而遮帘桩是指在码头前沿板桩结构后方打设一排或多排不连续的桩, 以遮挡后方土压力, 减小前沿板桩墙的受力, 其特点是截面大、刚度大, 使填土与板桩墙身共同作用, 大大改善了前沿板桩墙的受力情况, 充分利用了被动土压力, 减小板桩的跨中

弯矩。目前该结构设计方法仍处于研究阶段, 尚无一个大家公认的设计计算方法。近年来, 随着计算机技术的迅速发展, 使得利用有限元分析软件来分析该结构的受力状态成为了可能。有限单元法进行设计的主要优点在于它能对复杂结构, 尤其是对复杂边界条件、复杂的地层条件和复杂的荷载条件等的计算处理都比较方便。

1 工程概况

京唐港#32码头^[1-3]为第一个深水遮帘式地连墙板桩结构码头, 为10万吨级通用散货泊位, 该项目由中交第一航务工程勘察设计院设计, 目前投产使用。码头所在位置处的地基土层为粉细砂层以及粉质黏土层和粉土层。拟建码头前沿泥面线高程为-16.0 m, 极端低水位-1.27 m, 正常水位为0.27 m, 高水位为2.02 m, 码头面堆载20 kPa。基于这种条件提出的遮帘式板桩码头结构设计方案: 前墙高27.0 m、厚1.0 m, 遮帘桩横截面为1.0 m×2.0 m, 间距为2.75 m, 长30.0 m, 锚碇墙高14.5 m、厚1.2 m, 均为钢筋混凝土构件; 连接遮帘桩和锚碇的长拉杆直径为95 mm, 而连接前墙和遮帘桩的短拉杆直径为75 mm, 拉杆间距约为1.2 m,

拉杆均为Q345的钢棒。其具有代表性的截面如下图1。

2 有限元计算模型^[4-8]

计算采用的软件为美国ANSYS公司的大型有限元软件, 按照平面应变问题建立模型。由于平面应变作为二维问题, 其建模方便, 计算耗时短, 如与实际工程较相吻合, 可方便工程应用推广, 同时在后续工作中将与三维空间模型计算结果进行比较。土体材料用六节点三角形平面单元PLANE2模拟, 遮帘桩、前墙及锚碇墙均采用梁单元Beam3来模拟, 钢拉杆用杆单元Link1来模拟。由于遮帘桩间距为2.75 m, 而前墙与锚碇墙均为连续墙, 故需要刚度等效原则把遮帘桩等效成连续墙。等刚度即等效前后刚度EI一致, E不变,

$$I = \frac{bh^3}{12}, \text{ 等效前} b = \frac{1}{2.75} \text{ m}, h=2, \text{ 等效后} b=1 \text{ m}, \text{ 代入公式求得} h=1.43 \text{ m}$$

模型的建立以及计算结果均采用国际标准单位。边界条件: 上部为自由边界, 左右两侧水平约束, 底部固定。其有限元网格划分见图2。

(1) 计算参数的选取

根据提供的地质资料, 计算选取的材料参数取值见表1。

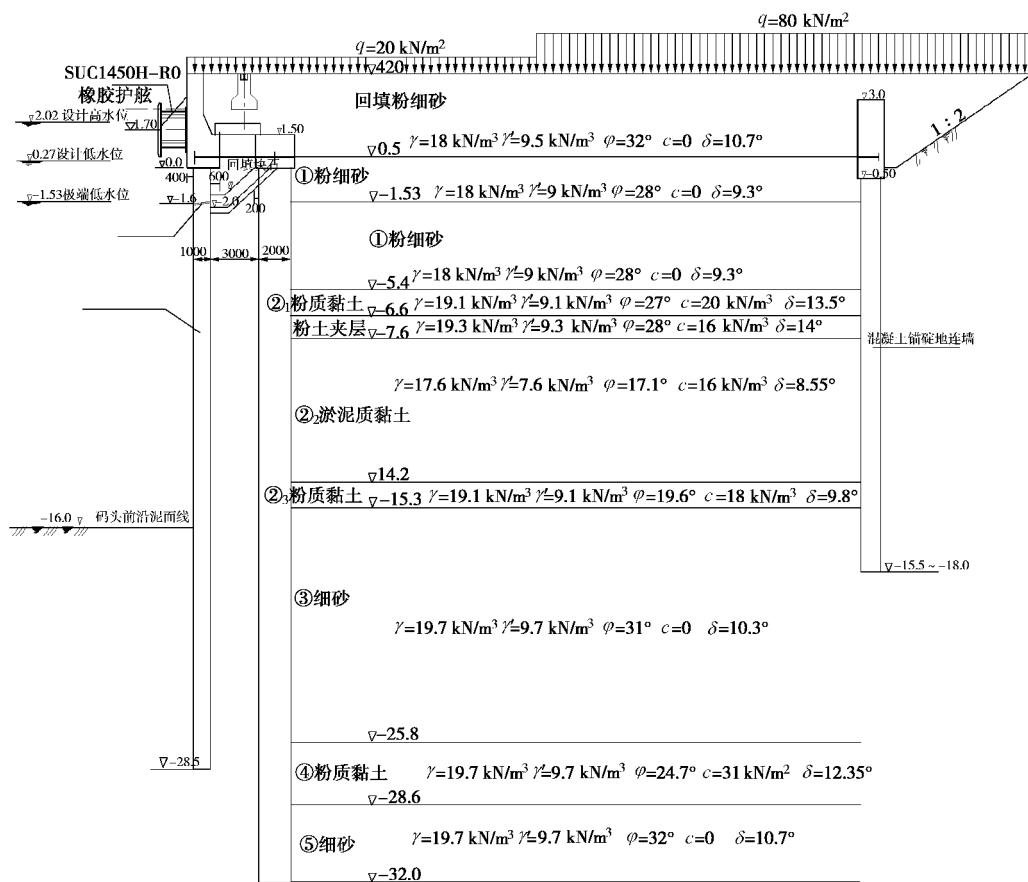


图 1 计算简图

Fig. 1 Calculation diagram

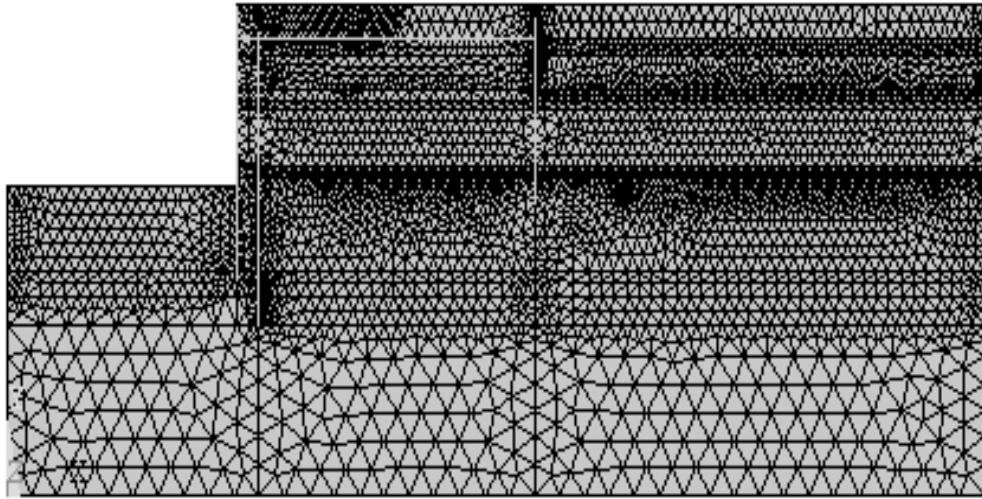


图 2 有限元模型图

Fig. 2 Finite element model

表 1 各材料计算参数

Table 1 Parameters for materials calculation

材料编号	材料类型	深度范围 /m	重度 /(kN · m ⁻³)	内摩擦角 /(^{\circ})	黏聚力 /Pa	弹性模量 /Pa	泊松比
1	回填粉细砂	4.2~0.5	18.0	32.0	5000	2.60×10^7	0.29
2	粉细砂	0.5~ -5.4	18.0	28.0	5000	2.60×10^7	0.29
3	粉质黏土	-5.4~ -6.6	19.1	27.0	20000	8.97×10^6	0.30
4	粉土夹层	-6.6~ -7.6	19.3	28.0	16000	12.6×10^6	0.30
5	淤泥质粘土	-7.6~ -14.2	17.6	17.1	16000	3.60×10^6	0.30
6	粉质黏土	-14.2~ -15.3	19.1	19.6	18000	8.97×10^6	0.30
7	细砂	-15.3~ -25.8	19.7	31.0	5000	2.60×10^7	0.29
8	粉质黏土	-25.8~ -28.6	19.7	24.7	31000	8.97×10^6	0.30
9	细砂	-28.6	19.7	32.0	5000	2.60×10^7	0.29
10	混凝土		25.0			2.80×10^{10}	0.20
11	钢		78.5			2.06×10^{11}	0.20

(2) 屈服准则的选用

本文采用理想弹塑性模型, 屈服准则是平面应变关联流动法则条件下 Mohr-Coulomb 准则精确相匹配的 Drucker-Prager 准则 (DP4), 是 Mohr-Coulomb 准则在平面应变下的特殊形式。其 a , k 为

$$a = \frac{\sin j}{\sqrt{3(3 + \sin^2 j)}}, \quad k = \frac{3c \cos j}{\sqrt{3(3 + \sin^2 j)}},$$

由于在 ANSYS 程序中只有莫尔-库仑外角外接圆准则, 当采用 DP4 准则时必须转化 C, j 值。

3 模拟计算及结果

为了与加遮帘桩后的工程效果做比较, 故设计工况 1, 模拟正常设计水位 0.27 m 无遮帘桩的情况, 与加遮帘桩后的情况进行比较。为了直接应用于工程验证, 故设计工况 2, 模拟正常设计水位 0.27 m 加遮帘桩后情况。在极端情况下, 为了保证工程的安全性, 设计了工况 3, 模拟极端低水水位 -1.53 m 下加遮帘桩时情况, 以验证工程安全性。在监测期间水位较高,

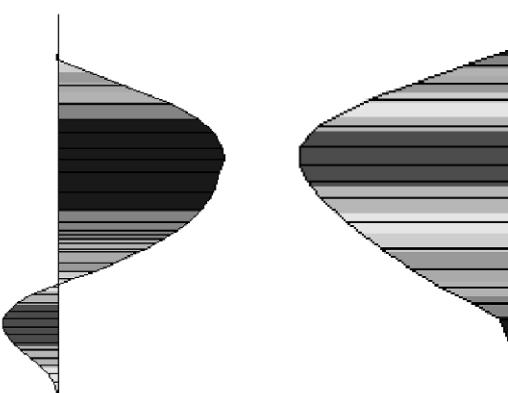
故设计工况 4, 模拟正常高水位 2.02 m 下加遮帘桩时情况。计算时土体水位以下取饱和重度, 水位以上取天然重度。计算分 4 个子步进行模拟: ①自重下坡体的变形及受力; ②加桩及杆后坡体的变形及受力; ③土体开挖, 加水压力荷载后坡体的变形及受力; ④加表面堆载后坡体的变形及受力。各种工况计算结果如下表 2 所示, 在正常设计水位 0.27 m, 锚碇墙、遮帘桩及后墙弯矩见图 3。

计算考虑了在拉杆上施加 50 kN 预应力, 计算结果表明此部分力对结构受力影响甚微。从计算结果来看, 在正常设计工况下, 加遮帘桩后, 前墙弯矩由 2340 kN/m 减少至 774 kN/m, 减少了约 70%; 负弯矩由 771 kN/m 减小至 700 kN/m, 减少了约 10%。加遮帘桩前后, 后墙的弯矩变化不大。加遮帘桩后, 极大的改善了前墙受力状况, 证实了遮帘桩结构的可行性。加桩后大小拉杆受拉力分别为 610 kN 及 272 kN, 其与加桩后大小拉杆受力 530 kN 及 264 kN 数值上相差不大。从锚定点位移来看, 加桩后前墙的位移由 10 cm 减小为 9 cm。

表 2 各工况计算结果

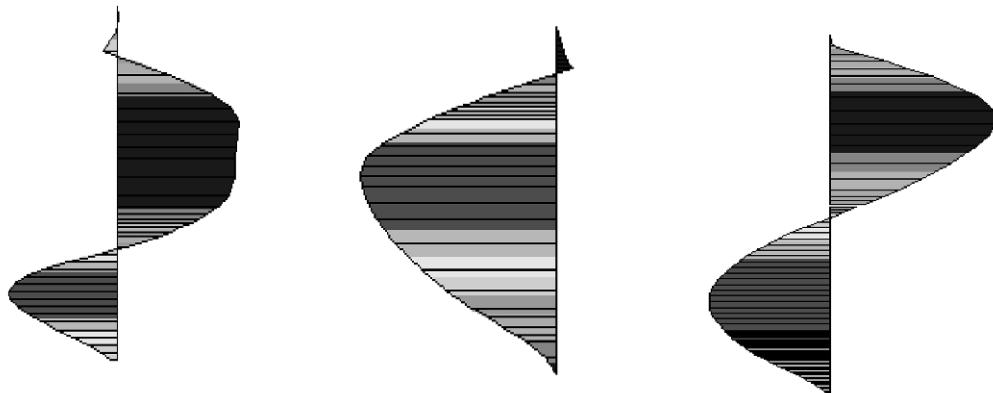
Table 2 Calculated results under different conditions

工况	前墙弯矩 /(kN·m)		后墙弯矩 /(kN·m)		遮帘桩弯矩 /(kN·m)	大拉杆拉力 /kN	锚碇点位移 /cm
	正	负	正	负			
工况 1	2340	-771	-825			648	10.0
工况 2	774	-700	-765	2739	-1988	636	9.0
工况 3	1140	-800	-727	3132	-2159	660	9.0
工况 4	548	-568	766	1713	-1713	433	5.4



(a) 工况1无桩时前墙弯矩

(b) 工况1无桩时后墙弯矩



(c) 加遮帘桩时前墙弯矩

(d) 加遮帘桩时后墙弯矩

(e) 遮帘桩上弯矩

图 3 前墙及遮帘桩弯矩图

Fig. 3 Bending moments of front wall and covered sheet pile structure

4 工程监测

为了进一步研究该新型码头结构的设计计算理论, 保证工程安全, 在码头施工期及使用期对码头结构进行原形观测。通过现场观测, 对码头结构可能出现的不利情况进行预测, 以保障码头的施工安全和正常使用, 为工程提供原型数据和资料, 探讨该种新型结构的工作机理。观测的重点是桩与墙于压力分布规律、拉杆力变化规律, 板与墙的结构内力及桩与墙的变形规律。

原型观测中不能直接观测弯矩, 通常是将墙体或桩体的待测截面处最外缘受力钢筋截断, 安装一对钢筋应力计, 观测两侧竖向钢筋的应力, 换算出截面的弯矩。钢筋计安置在结构两侧, 钢筋计每2~3 m设计

一个, 在可能最大弯矩部位进行了加密。变形监测是在前墙、遮帘桩和锚碇墙内埋设测斜管、变形及沉降观测点。对于前墙、遮帘桩和锚碇墙, 锚碇点位移是重要的设计参数。拉杆首先进行初始应力测试, 然后在施工中和使用过程中观测拉杆应力的变化情况。

观测期间潮水位一般介于1.5~2.0 m之间。均值在1.7 m以上。

根据设计要求, 码头原型观测共布置了3个断面, 编号分别为#2, #3, #4。量测仪器, 拉杆采用Gookon 4150型高精度应变计, 弯矩测量钢筋计选用310 MPa量程。

南京水利科学研究院组织相关人员于2005年2月完成了仪器埋设, 2005年6月至2008年2月进行了观测。观测结果列表如下, 见表3。

表3 观测结果
Table 3 Observed results

观测断面和计算工况	前墙弯矩/(kN·m)		锚碇墙/(kN·m)		桩弯矩/(kN·m)		杆拉力/kN	锚碇点位移/cm
	最大	最大负弯矩	最大负弯矩	最大正弯矩	最大负弯矩			
观测断面	#2	813	-1119	-762	1735	-2001	601	6.2
	#3	682	-936	-847	1907	-2054	526	
	#4	845	-839	-627	2180	-1823	446	4.7
计算结果	工况2	774	-700	-765	2739	-1988	636	9.0
	工况4	548	-568	-766	1713	-1713	433	6.5

与计算结果比较, 前墙的正弯矩相差不大, 负相差稍偏大, 这种情况在一般工程中不大可能会出现, 负弯矩不大可能比正弯矩大很多。锚碇墙计算结果与观测值一致。遮帘桩弯矩监测结果介于正常水位与高水位之间, 其结果基本吻合。拉杆力计算值稍偏小, 锚碇点位移计算值与监测值基本吻合。

5 结语

遮帘桩作为一种新型的码头支护结构, 其结构设计方法仍处于研究阶段, 无一个大家公认的合理的设计计算方法。借助于有限元方法, 可以对其设计进行验证。从计算结果来看, 在正常设计工况下, 前墙正弯矩减少了约70%; 负弯矩减少了约10%。加遮帘桩前后, 后墙受力变化不大。从锚定点位移来看, 加桩后前墙的位移由10 cm减小为9 cm。目前监测的水位与正常高水位接近, 其锚碇点位移与计算值基本吻合。通过工程监测, 计算与监测结果基本接近, 但存在一定的偏差, 可能的主要原因为监测时水位介于高水位及正常水位之间, 也可能受其他因素影响。数值计算表明, 按平面应变建立的二维模型, 其结果与实际工程监测较相吻合, 可用于工程应用。

参考文献:

- [1] 于泳. 遮帘式板桩码头方案的提出与研究[J]. 港工技术, 2005(增): 30 - 32. (YU Yong. Generation and study on proposal of covered type of sheet pile wharf[J]. Port Engineering Technology, 2005(S): 30 - 32. (in Chinese))
- [2] 焦志斌, 蔡正银, 王剑平, 等. 遮帘式板桩码头原型观测技术研究[J]. 港工技术, 2005(增): 56 - 59. (JIAO Zhi-bin, CAI Zheng-yin, WANG Jian-ping, et al. Study on prototype observation technique of semi-covered type of sheet pile[J]. Port Engineering Technology, 2005(S): 56 - 59. (in Chinese))
- [3] 李元音, 刘永绣. 遮帘式板桩码头结构的空间有限元分析[J]. 港工技术, 2005(增): 37 - 40. (LI Yuan-yin, LIU Yong-xiu. Spatial finite element method to analyze covered type structure of sheet piles wharf structure[J]. Port Engineering Technology, 2005(S): 37 - 40. (in Chinese))
- [4] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3381 - 3388. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang yi. Application of strength reduction FEM to soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381 - 3388. (in Chinese))
- [5] 赵尚毅, 时为民, 郑颖人. 边坡稳定性分析的有限元法[J]. 地下空间, 2001, 21(5): 450 - 454. (ZHAO Shang-yi, SHI Wei-min, ZHENG Ying-ren. Finite element method of stability analysis for side slope [J]. Underground Space, 2001, 21(5): 450 - 454. (in Chinese))
- [6] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57 - 61. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Lu-yu. Slope stability analysis by strength reduction FEM[J]. Engineering Science, 2002, 4(10): 57 - 61. (in Chinese))
- [7] 郑颖人, 赵尚毅, 张鲁渝. 有限元强度折减法在岩坡和土坡中的应用[C]// 中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集, 2002: 39 - 41. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, ZHANG Lu-yu. Application of strength reduction FEM to soil and rock slope[C]// Proceedings of the 7th Conference on Rock Mechanics and Engineering, 2002: 39 - 41. (in Chinese))
- [8] 郑颖人, 赵尚毅, 邓楚键, 等. 有限元极限分析法发展及其在岩土工程中的应用研究[J]. 中国工程科学, 2006, 8(12): 39 - 61. (ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, DENG Chu-jian, et al. Development of finite element limit analysis method and its applications in geotechnical engineering[J]. Engineering Science, 2006, 8(12): 39 - 61. (in Chinese))