



# 双排钻孔灌注桩坞墙结构设计

顾宽海<sup>1,2</sup>, 朱忠余<sup>1</sup>, 陆晶晶<sup>1</sup>

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 大连理工大学, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 结合浙江某船厂船坞改扩建工程可利用岸线和空间极其有限、地质条件复杂、施工条件局限等特点, 提出了一种双排钻孔灌注桩坞墙结构。在分析其作用机理和计算方法的基础上, 给出了一种基于 $m$ 法的数值模拟方法, 并对该结构进行了详细的受力分析, 为本工程提供了可靠的结构设计依据。

**关键词:** 双排钻孔灌注桩坞墙; 船坞;  $m$ 法

中图分类号: U 673.331

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)09-0138-05

## Structural design of double-wall bored pile dock wall

GU Kuan-hai<sup>1,2</sup>, ZHU Zhong-yu<sup>1</sup>, LU Jing-jing<sup>1</sup>

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Considering that the shipyard dock renovation and expansion project of Zhejiang is characterized by extremely limited shoreline and space, complicated geologic conditions, confined construction conditions, we propose a dock wall structure, i.e. double-wall bored pile dock wall structure. Based on the analysis of the mechanism and calculation methods, this paper gives a numerical simulation method and detailed stress analysis for the new structure, which provides reference for similar projects.

**Key words:** double-wall bored pile dock wall; dock;  $m$  method

坞墙是保障干船坞正常工作的重要水工结构, 同时也是船坞建设时投资较大的部分<sup>[1]</sup>。近年来, 随着我国水运事业的蓬勃发展, 适宜建造经济型船坞的岸线资源越来越少, 为了发展的需要, 不得不在有限的岸线、复杂的周边环境及地质条件下建造船坞, 这给船坞工程的设计师们带来了一定的技术挑战。

在浙江某船厂船坞改扩建工程中, 1#船坞(有效尺度为200 m × 30 m × 13.30 m)的改建受到东侧2#码头、西侧船台、北侧道路等已建构筑物的限制, 东坞墙不得不伸入地质条件复杂的海中40 m, 且与东侧码头仅16.8 m距离。设计坞墙须具有在施工期作为止水围堰, 在使用期作为挡水、挡土结构, 且需自立等特点。国内外常规的拉锚

板桩坞墙、扶壁式坞墙等结构已不适用, 因此研究、探索一种适用于狭窄空间内建造的自立式坞墙结构具有十分重要意义。

本文结合上述坞墙的特点, 提出了双排钻孔灌注桩坞墙结构形式, 并基于ANSYS空间有限元分析软件对其作用机理和计算方法进行了详细的探讨和研究, 给出了实用的计算方法, 为工程提供了可靠的设计依据, 也为类似结构的研究和进一步优化坞墙结构提供参考依据。

## 1 设计条件

浙江某船厂船坞改扩建工程位于浙江省舟山市定海区西南部, 拟建方案将废除现有船坞, 新建2座船坞, 主要工程设计难点如下:

收稿日期: 2013-03-01

作者简介: 顾宽海(1973—), 男, 高级工程师, 从事总图及水工结构设计。

### 1) 环境条件复杂。

船坞建设期间,要求不影响邻近东侧2#码头的使用。拟建1#坞东坞墙离已建的东侧高桩梁板结构的2#码头仅16.8 m,将处在自然环境条件恶劣的海域上。坞墙结构主体设计尺寸受限制,施工随时会受到波浪和水流影响,以及2#码头引桥等构筑物制约,影响因素较多。

### 2) 地质条件复杂。

根据本工程的地质报告,海上部分的东坞墙座落于软土上,但软土覆盖层较薄,其中坞室底板上约有4 m厚的灰色、饱和、流塑、具有高压缩性的②淤泥质粉质黏土,土的密度为 $1.785 \text{ t/m}^3$ ,固快粘聚力标准值为 $13.8 \text{ kPa}$ ,内摩擦角为 $8.7^\circ$ ,且属于灵敏度为5.4的高灵敏土,底板面下有约6.5 m厚的⑨强风化凝灰岩和⑩中风化凝灰岩,地质条件差。

### 3) 地质水文条件差。

根据本工程的地质报告,⑨强风化凝灰岩渗透系数 $K=1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,⑩中风化凝灰岩的渗透系数 $K=1.36 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ ,⑨层和⑩层属中透水层,与海水相联系,水力连通性较好。

## 2 设计方案

根据上述的设计条件,制约1#坞东坞墙建造的因素较多,地质条件复杂、地质水文条件差,特别是环境条件复杂、空间狭窄,加之施工需要该段采用水上施工等因素给坞墙设计带来了极大困难。若采用传统的拉锚板桩坞墙结构,设置锚碇的距离不够,锚碇系统也不可坐落于水上;若采用大开挖的扶壁式坞墙结构,空间太小,无法设置临时围堰进行干施工。

综合考虑使用要求、水文地质条件、环境条件以及施工条件等因素,该段坞墙结构设计采用较新型的双排钻孔灌注桩坞墙结构,位于1#坞东坞墙从坞口往坞尾40 m范围,平面位置如图1所示,结构断面如图2所示。

高桩承台宽约 $17.2 \sim 18 \text{ m}$ ,共2个分段,分段长度 $20 \text{ m}$ ,顶面高程 $3.05 \sim 3.34 \text{ m}$ (考虑与码头面衔接)。承台下设一排 $\phi 1\,200 \text{ mm}$ 钻孔灌注桩形

成坞墙侧壁,桩间距 $1.25 \text{ m}$ ,在其后 $10.5 \text{ m}$ 处布置 $\phi 1\,000 \text{ mm}$ 钻孔灌注桩排桩,桩间距 $1.11 \text{ m}$ ,在排桩中间和平台后沿布置 $\phi 1\,000 \text{ mm}$ 钻孔灌注桩,间距 $5 \text{ m}$ ,桩顶高程均为 $-1.0 \text{ m}$ 。

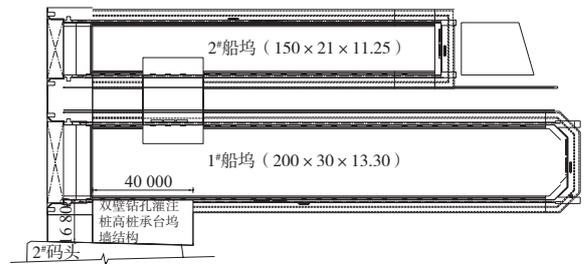


图1 浙江某船厂船坞总平面布置

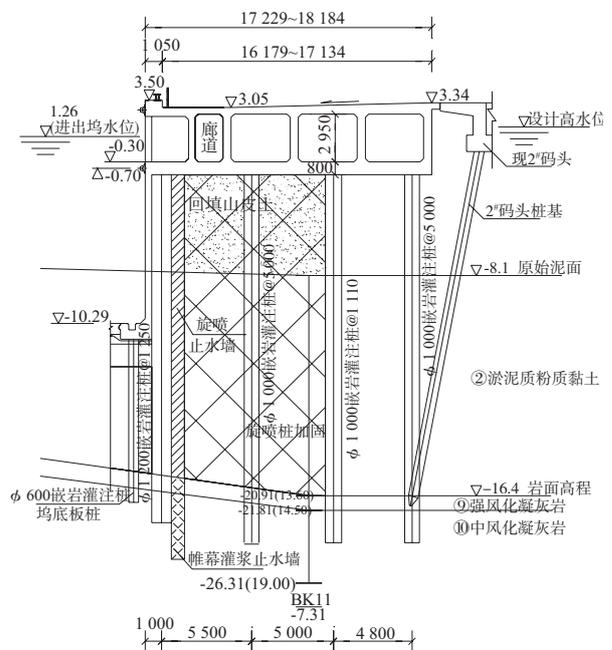


图2 双排钻孔灌注桩坞墙结构剖面

考虑桩的入土深度较浅,桩端采取嵌岩,排桩之间回填山皮土,坞墙侧壁采用 $400 \text{ mm}$ 厚钢筋混凝土衬砌,为确保坞墙侧壁有效止水和避免双排桩间土体的流失,前排板桩后和后排板桩前及两侧板桩后均设2~3排 $\phi 800 @ 600 \text{ mm}$ 的旋喷桩止水墙。为确保坞墙永久安全稳定,对双排板桩范围内淤泥质土进行旋喷桩加固处理。

## 3 结构计算原理

### 3.1 坞室开挖坞墙变形机理分析

坞室开挖的过程就是坞室侧壁水平方向的

卸荷过程。坞室侧壁水平方向的卸载,使得坞墙两侧压力不再平衡,坞室内土体挖走必然引起桩顶向坞室运动的趋势,从而引起坞墙后土体应力状态的变化。当坞墙后土体未达极限状态之前,开挖面以上水平向土压力大小介于主动土压力与静止土压力之间。随着坞室开挖深度的加大,作用在坞墙上的土压力差使坞墙产生向坞室内的位移,即坞墙水平位移<sup>[2]</sup>。

当坞室开挖较浅,底板还未形成支撑时,无论是刚性挡土墙(如水泥土搅拌桩墙,地下连续墙等)还是柔性挡土墙(如钢板桩等),均表现为墙顶位移最大,向坞室方向的水平位移呈三角形分布,如图3 a),随着坞室开挖深度的增加,刚性挡土墙体继续表现为向基坑内的三角形位移或平行刚体位移。而柔性挡土墙若设支撑,则表现为墙顶位移不变或逐渐向基坑外移动,墙体腹部向坞室内突出(图3 b))。

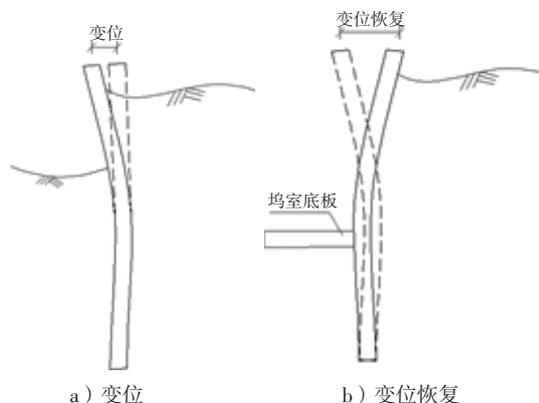


图3 墙体水平变形

### 3.2 双排钻孔灌注桩坞墙结构作用原理

双排钻孔灌注桩坞墙结构可以理解为一个插入土体的封闭刚架,由两排密排灌注桩、两排稀疏排列的灌注桩和上部现浇廊道组成。整个坞墙结构靠坞室底板以及底板以下桩前土的被动土压力及刚架插入土中的部分前桩抗压、后桩抗拔所形成的力偶来共同抵抗倾覆力矩,当然,桩土之间的相互作用不容忽略。在荷载作用下,后排桩向坞室内运动,势必受到密排桩间土的抗力作用,同时,桩间土也对前排桩产生一个推力作用。

双排钻孔灌注桩坞墙结构由于存在双排结构使得其受力机理非常复杂,结构的实际受力情

况很难确定。前后排密排灌注桩在止水帷幕的作用下形成两面不透水的墙体,若间距过小,则中间土体不足以形成完全的经典土压力作用条件,其土压力类似于贮仓压力的作用形式,若间距足够大,则可以按照主动土压力或者静止土压力的计算方法对双排钻孔灌注桩进行受力分析。然而前后排桩距对土压力影响的判断标准很难进行量化,对于不同的结构方案需要进行具体分析。

### 3.3 双排钻孔灌注桩坞墙结构计算方法

由于双排钻孔灌注桩坞墙结构属于较新型结构,计算理论和方法并不成熟。根据对桩土作用的不同处理方式,常用的主要有 $m$ 法、土连杆法和考虑土作为实体单元的空间有限元分析方法<sup>[3]</sup>。

从输入条件和计算方法来讲, $m$ 法较其他两种方法更为明确,尤其是输入参数的选取,后两种方法土体本构和接触参数的选取均具有一定的经验性。为确保设计的安全可靠,本文选用应用较成熟的 $m$ 法进行计算。

$m$ 法的基本假定为:将土体视作弹性介质,具有沿深度成正比增长的地基系数;桩的位移与桩的长度相比桩的位移较小;桩处于弹性状态,并服从胡克定律。 $m$ 值通常是根据试验确定,当无试验资料时,可根据土的种类按表查用。

根据Winkler假定,考虑桩土共同作用,确定前、后排桩在开挖面以上的土压力、水压力等荷载及地基土的水平地基反力系数,按照弹性地基梁和杆系有限元的分析方法即可求出双排钻孔灌注桩坞墙结构的内力,具体计算步骤如下:

- 1) 建立施工期计算模型,考虑施工期对应的荷载工况,得到施工期结构内力计算结果;
- 2) 建立使用期计算模型,考虑使用期相对于施工期的荷载增量,得到增量作用的结构内力计算结果;
- 3) 将施工期结构内力计算结果与使用期增量作用的内力计算结果迭加,得到实际结构的内力计算结果。

## 4 ANSYS空间有限元计算

### 4.1 计算模型

考虑到双排钻孔灌注桩坞墙结构前后各排

桩桩径及空间间距不同, 本文采用有限元分析软件 ANSYS 对结构进行三维空间计算分析。选取 20 m 作为一个计算分段。其中钻孔灌注桩选用梁单元 BEAM4 模拟。廊道按实际框架建模, 采用 SHELL63 单元模拟。廊道与钻孔灌注桩的连接考虑固接, 结构与土之间的作用采用 COMBIN14 单元模拟, 旋喷加固结构通过提高对应区域土体的  $m$  值进行模拟, 有限元计算模型见图 4。

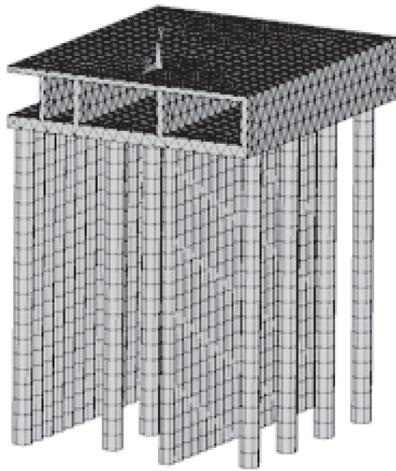
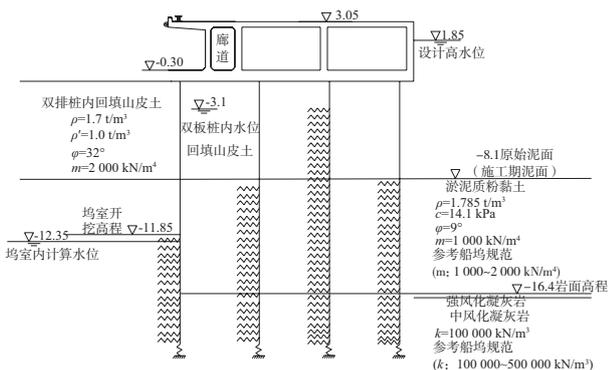
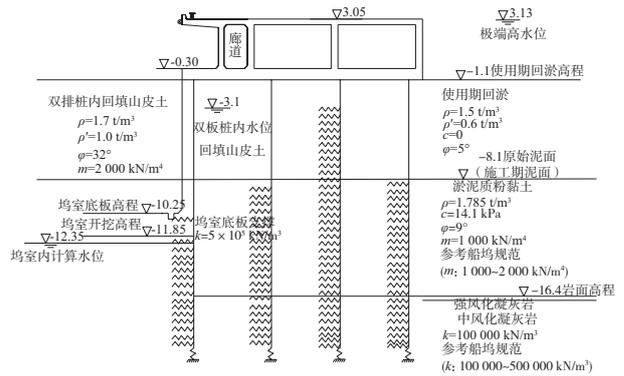


图 4 双排钻孔灌注桩坞墙结构 ANSYS 计算模型

本文考虑施工期和使用期两种计算模型, 主要不同之处在于是否考虑坞室底板的支撑作用。施工期考虑墙前开挖至底板底高程处, 弹簧从底板底高程以下 500 mm 处开始考虑, 土弹簧  $m$  取值依照实际土层的性质查表得到; 使用期考虑底板的支撑作用, 在底板与坞墙侧壁接触处考虑支撑弹簧, 底板以下考虑土弹簧,  $m$  法计算模型见图 5。



a) 施工期



b) 使用期

图 5  $m$  法计算模型

## 4.2 计算荷载

### 4.2.1 施工期计算荷载

#### 1) 土压力。

由于前后两排密排桩之间的土体为有限土体, 岩面以上土体深度与桩间距之比为 1.46, 根据贮仓压力的计算条件 (高度与间距比 1.5), 比值处于临界值时, 需要同时考虑主动土压力和贮仓压力, 通过对两种算法土压力作用值的对比, 主动土压力计算结果略大于贮仓压力的计算结果, 从设计安全角度考虑, 土体对前排桩的作用按主动土压力计算, 土体对后排桩的作用按贮仓压力计算。

#### 2) 水压力。

考虑施工期的计算水位, 坞室内取 -12.35 m (按开挖面以下 0.5 m 计算), 前后排桩之间取 -1.1 m (略高于设计低水位), 坞室外取 1.85 m (设计高水位)。

### 4.2.2 使用期计算荷载

#### 1) 土压力。

坞室建成高程为 -10.25 m, 相对于施工期, 使用期的土压力考虑载荷的增量作用, 即坞室外天然泥面到 -1.1 m 这部分回淤和均载或流动机械荷载产生的土压力增量, 按照静止土压力计算。

#### 2) 水压力。

考虑使用期的计算水位, 坞室内取 -11.9 m, 坞室外取 3.13 m (极端高水位)。相对于施工期, 使用期的水压力考虑载荷的增量作用, 即坞室外 1.85 m 到 3.13 m 水头产生的水压力增量。

## 4.3 计算结果

对应上述的两种荷载工况, 采用 ANSYS 的主

要计算结果见图6~9，根据计算得到内力结果即可

完成对双排钻孔灌注桩结构的配筋等方面设计。

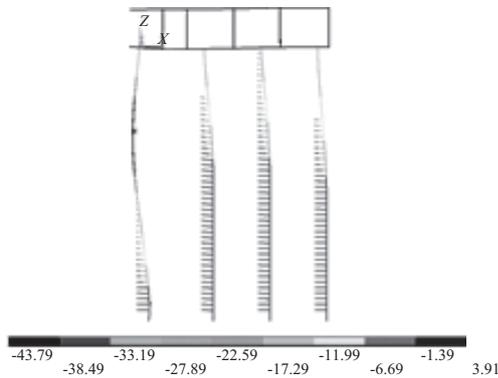


图6 施工期位移 (单位: mm)

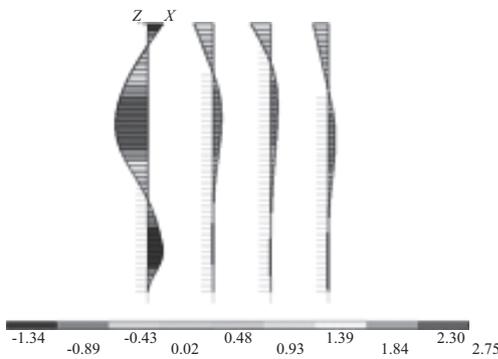


图7 施工期弯矩 (单位: MN · m)

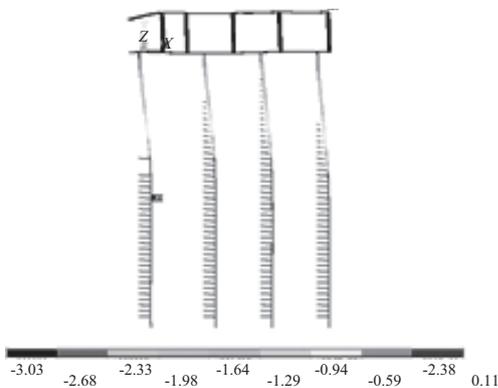


图8 使用期位移增量 (单位: mm)

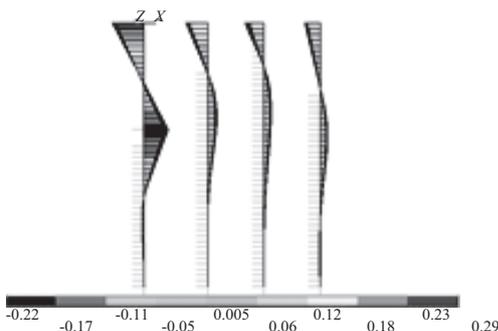


图9 使用期弯矩增量 (单位: MN · m)

### 5 施工及监测要求

主要施工顺序：清除浮泥→钻孔灌注桩施工→双排钻孔灌注桩临时对拉→双排桩间土体回填→旋喷桩止水墙和加固体的施工→廊道施工→坞室开挖→坞室底板施工→坞墙衬砌施工→主体结构完成。

监测要求：为掌握工程施工情况，实行信息化施工和管理，必须进行施工监测，以便根据不断变化的外部环境条件和施工实际情况适当调整施工步骤，安全顺利地进行工程作业，以确保工程施工安全、施工质量可靠。本结构主要监测内容：钻孔灌注桩排桩的内力监测，钻孔灌注桩排桩的变形监测，坞墙廊道的位移、沉降监测，坞墙前、后水位监测。

### 6 结论

1) 在综合考虑了工程各种不利条件的情况下，提出了一种适用于有限的岸线和狭窄空间内建造，具有自立、变形小、施工适应强等特点的双排钻孔灌注桩坞墙结构，丰富了坞墙结构的设计类型，使船坞建设选址更具有选择性。

2) 坞墙设计中应注意前后排桩距对土压力影响分析和m值选取，确保计算结果的合理性。

3) 坞墙施工中应注意止水墙和加固体的施工质量，以及控制好坞室土体的开挖速度，确保坞墙整体施工质量。

### 参考文献：

- [1] 顾民权. 海港工程设计手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 1997.
- [2] 曹俊坚, 平扬, 朱长岐, 等. 考虑圈梁空间作用的深基坑双排桩支护计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 709-712.
- [3] 李成军, 韩时林, 黄博, 等. 前板桩后高桩式新型坞墙的计算方法探讨[J]. 中国水运, 2012(3): 262-264.

( 本文编辑 武亚庆 )