



适用超大型门式起重机出运工艺的新型海洋重工码头设计创新

吴爱清, 俞武华, 程 凯

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要: 打造世界第一的2台11 000 t轨道式门式起重机, 超大型海洋重工产品直接吊运下水、对接、合拢, 是海洋重工产品制造工艺、出运工艺的重大突破。为满足工艺设备轨道基础的超大荷载和严格的变形使用要求, 设计提出的超宽整体卸荷式钢桩组合板桩码头结构方案, 结构新颖。而码头结构受力复杂, 尚无成熟的计算方法, 其受力模型和计算方法值得进一步研究和探讨。

关键词: 海洋重工码头; 11 000 t轨道式门式起重机; 整体卸荷式钢桩组合板桩结构

中图分类号: U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)02-0108-07

Design innovation on new offshore platform terminal with applicable super gantry crane handling technology

WU Ai-qing, YU Wu-hua, CHENG Kai

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: It is a great breakthrough in ocean heavy industry that the manufacturing of the first rail-mounted $2 \times 11\,000$ ton gantry crane in the world, as well as direct unloading, split and assembling for super-heavy industry products. To meet requirements on the rail foundation with extreme heavy loading and strict deformation criteria, a new structure type of composited steel pipe pile and sheet pile with extreme wide integrated relieving slab is developed. No well developed calculation method can be referred at the moment due to its structural complexity. The bearing mechanism and calculation method remain the topics for further research.

Keywords: offshore platform terminal; 11 000-ton rail mounted gantry crane; composited structure of steel pipe pile and sheet pile with integrated relieving slab

随着世界经济的发展, 能源需求不断增加, 石油和天然气的勘探与开发从陆地走向海洋是大势所趋。海洋工程装备业正面临着战略性的发展机遇, 今后5年将是我国海洋重工产品行业大发展的黄金时期^[1]。为了适应新形势发展的需要, 促进海洋工程事业新市场的开发, 开展新型海洋重工产品建造工艺的研究、建设新型的海洋重工出运码头具有十分重要的意义。

1 项目背景

四川宏华集团是专业从事石油钻机、海洋工程及石油勘探开发装备的研究、设计、制造、总装成套的大型设备制造及钻井工程服务企业, 是中国最大的石油钻机成套出口企业和全球最大的陆地石油钻机制造商之一。近年来, 宏华集团面对海洋工程装备行业发展的大好形势, 在稳固全球产能最大陆地钻机制造能力的同时, 确定实施

收稿日期: 2013-08-31

作者简介: 吴爱清(1963—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计咨询工作。

“下海”战略,经过充分的咨询和分析,拟在江苏省启东市投资建设宏华启东海洋油气装备制造基地工程,制造产品为工作水深大于1 000 m的浮式钻井平台生产系统等海洋重工产品。

在竞争越来越激烈的海洋重工产品制造市场,保证建造质量缩短建造周期成为众多海洋工程总装建造基地的追求目标。影响海洋平台建设周期的因素很多,但是最主要的环节是平台分段的划分以及总装合拢技术方案的实施^[2]。目前国内大多数船厂在建造海洋重工平台过程中均采用分段建造、整体合拢的方式,但由于受到场地和设备的限制,均存在总装合拢过程不紧密、水陆施工不连续的问题,其有限的合拢能力严重制约了企业的市场竞争力。宏华集团为把宏华启东海洋油气装备制造基地工程打造成为现代海洋重工产品先进制造基地,按照“高起点、高技术、高效益”的建设理念,从缩短海洋重工产品建造周期、大力提高企业的建造能力的要求出发,提出了一种新型的海洋重工产品建造模式:建设新型海洋重工出运码头,通过超大型轨道移动式起重机将海洋重工产品吊运下水,再进行对接合拢,成为无需滑道、半潜驳出运就可完成海洋重工产品的下水和总装合拢工艺^[3],实现了“海洋装备陆地造”的理念。

2 新型海洋重工产品出运码头设计创新

2.1 11 000 t轨道式门式起重机吊运工艺

宏华启东海洋油气装备制造基地生产的代表性海洋重工产品主要有400 ft自升式钻井平台和半潜式钻井平台,其具体参数如表1所示。

表1 海洋重工产品参数				
代表产品	总长/m	型宽/m	型深/m	吃水/m
400'自升式钻井平台(16 800 t)	76	70	9.4	6.7
半潜式钻井平台(35 000 t)	120	80		7.2

为了实现海洋重工产品制造工艺的突破,宏华启东海洋油气装备制造基地打造世界第一的轨道式门式起重机——宏海号,宏海号由2台11 000 t轨道门式起重机组成,其最大起重量达到22 000 t,轨距124.3 m,总体高度150 m,提升高度最高为

71.38 m,相当于能把500节高铁车厢或20层楼高的超重、超大型物件提升起来并行走。宏海号主体结构由桁架式拱型龙门大梁、起重机运行机构、电气设备和维修用悬挂葫芦组成。桁架式拱型主梁结构通过焊接与刚性腿上端连接,通过铰接与柔性腿上部连接,刚、柔性腿下端通过轴销与行走机构连接。图1为宏海号示意图。

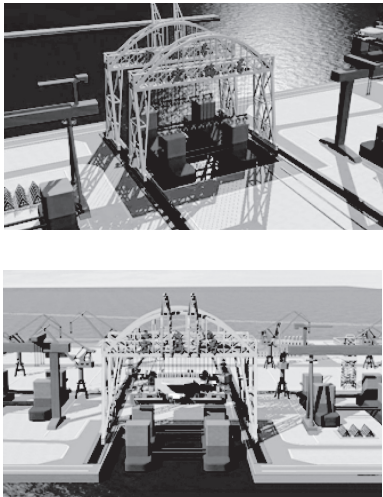


图1 宏海号示意图

世界第一的起重能力、自身移动式的运行方式是宏海号独一无二的特点。宏海号能够从陆上整体起吊22 000 t的自升式石油钻井平台主甲板下水;也能从陆上整体起吊22 000 t的半潜式石油钻井平台的下浮体、上部主甲板下水,并进行下浮体和上部主甲板的拼装对接。以半潜式钻井平台的建造为例,其工艺流程如下:平台下浮体主结构和上部甲板结构同时在陆地上开工制造,下浮体主结和上部甲板主结构总装完成后→下浮体运输到起吊区→用宏海号吊运下浮体主结构入港池→上部甲板主结构运输至起吊区→用宏海号吊运上部主结构至下浮体主结构的上方→下浮体主结构和上部甲板主结构对接→用宏海号起重机整体吊装钻机下部结构、钻机井架、生活楼以及其它大型模块。宏海号上配置的2×600 t起重机也可用于钻井平台桩腿和钻井架等其它大型模块的安装。

基于上述工艺,宏华海洋启东制造基地能同时进行10个海上钻井平台建造。单个平台的建造周期可显著地缩短,省去了船坞、半潜驳和其它吊机费用,节省了大量的工时。其中半潜式平台

制造工期可以节省约3个月周期,自升式平台制造工期可以节省1~3个月周期。该建造工艺突破了世界海洋装备平台传统建造方式,基本实现了“海洋装备陆地造”的理念,有效提高了海洋重工产品建造效率,制造、出运工艺经济、安全、快捷,促进了海洋装备制造技术的发展。

2.2 挖入式港池的码头布置

根据宏海号的出运工艺要求,出运码头由出运港池、宏海号轨道基础及出运工位组成,其平面尺度及高程设计应结合海洋重工产品的设计参数及工程区风、浪、流、泥沙、地形、地质等自然条件综合确定。

2.2.1 出运港池尺度

出运港池长度根据宏海号吊装出运工艺需要,并结合半潜式钻井平台系缆需要确定。半潜式钻井平台长度为120 m,其首、尾两端的富裕长度参照《海港总平面设计规范》均取为15 m,港池长度为150 m。

出运港池宽度 $B=b$ (海洋重工产品宽度)+ $2d$,其中 b (海洋重工产品宽度)为代表性海洋重工产品的最大宽度,取80 m(半潜式平台); d 为海洋钻采系统在拖航作业时两侧与港池壁之间的富裕宽度,取15 m,港池宽度为110 m。

2.2.2 高程设计(1985国家高程)

1) 设计水位。

设计高水位:2.60 m(高潮累积频率10%潮位);

设计低水位:-1.88 m(低潮累积频率90%潮位);

极端高水位:4.29 m(重现期为50 a的年极值高水位);

极端低水位:-2.85 m(重现期为50 a的年极值低水位);

防洪设计水位:4.54 m(50 a一遇)。

2) 出运港池岸壁结构顶面高程。

出运港池岸壁结构顶面高程应高于防洪设计水位,并与后方陆域高程一致,取为4.80 m。

3) 出运港池设计河底高程。

出运港池设计水深

$$D=T+Z_1+Z_2+Z_3+Z_4 \quad (1)$$

式中: D 为码头前沿设计水深(m); T 为海洋重

工产品最大吃水(m); Z_1 为龙骨下最小富裕深度(m); Z_2 为波浪富裕深度(m); Z_3 为因配载不均匀而增加的尾部吃水值(m); Z_4 为备淤富裕深度(m)。

出运港池主要用于半潜式浮体下水以及上部平台与下部浮体整体合拢作业,因此海洋重工设计代表产品的吃水取为7.2 m。出运港池的设计水深为 $D=8.6$ m。

由于海洋重工合拢周期较长,且合拢过程中不能如普通船舶一样离泊,设计中必须考虑出运港池工作过程中可能发生的最低水位,即极端低水位-2.85 m,故港池泥面设计高程=-11.45 m,取为-11.50 m。

2.2.3 出运码头布置

出运码头采用挖入式港池的码头布置形式,港池平面尺度为150 m×110 m,宏海号轨道基础布置在出运港池两侧,轨距124.3 m,根据海洋重工产品出运工位及出运港池平面尺度布置,宏海号港池侧轨道长162 m,陆域轨道长143 m。其平面布置如图2所示。

2.3 整体卸荷式组合板桩码头结构

本工程码头结构既是出运港池岸壁结构,又是宏海号的轨道基础。由于宏海号单机自重达7 300 t,组合吊重达22 000 t,使用过程中其总重达36 600 t,大大超过了普通码头使用荷载。宏海号起重高度达71.38 m,结构高度达150 m,在其使用过程中产生的水平推力及扭矩,以及在风荷载作用下的水平向荷载作用也会对码头结构产生很大的影响。而海洋重工产品合拢过程中要求的水平及竖向位移的精度很高,因此,码头结构应具有承受宏海号超大竖向及水平向荷载的承载能力,且其在荷载作用下的位移也应满足宏海号作业需要。

2.3.1 设计条件及要求

1) 水文。

本工程地处长江口北支,潮型呈不规则半日潮,潮波变形较为剧烈。

2) 地质。

工程区域内钻探揭示地层表层主要由人工

填土及粉细砂,中层为较厚的一层淤泥质粉质黏土,底层以粉质黏土砂夹土或粉细砂夹黏性土为主,可作为本工程基础结构的桩端持力层。工程地质剖面如图3所示。

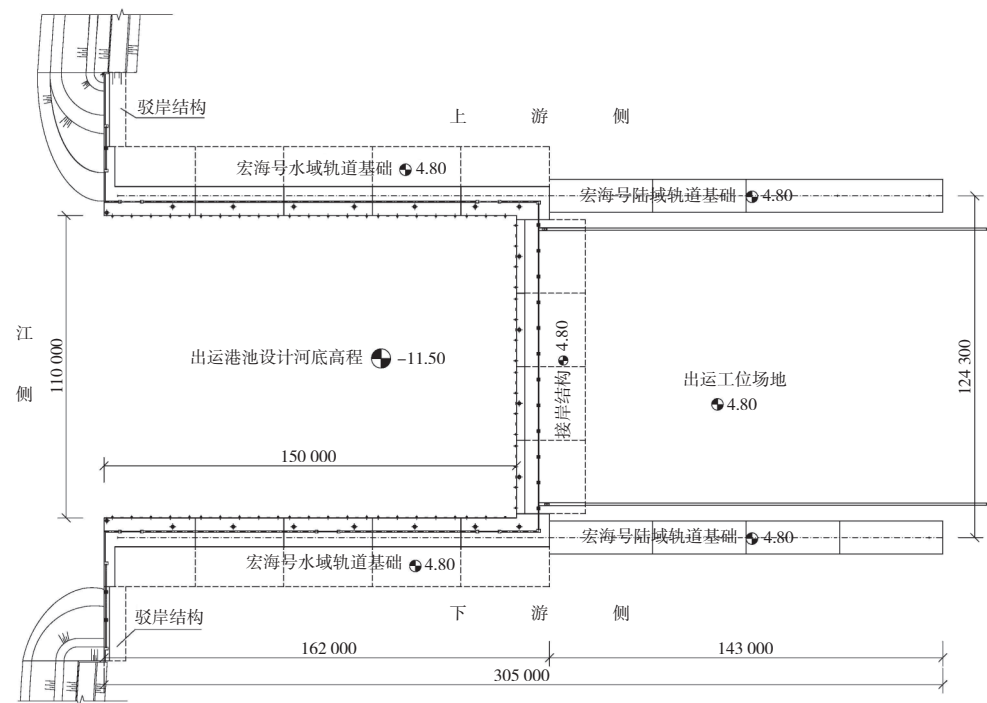


图2 出运码头平面布置

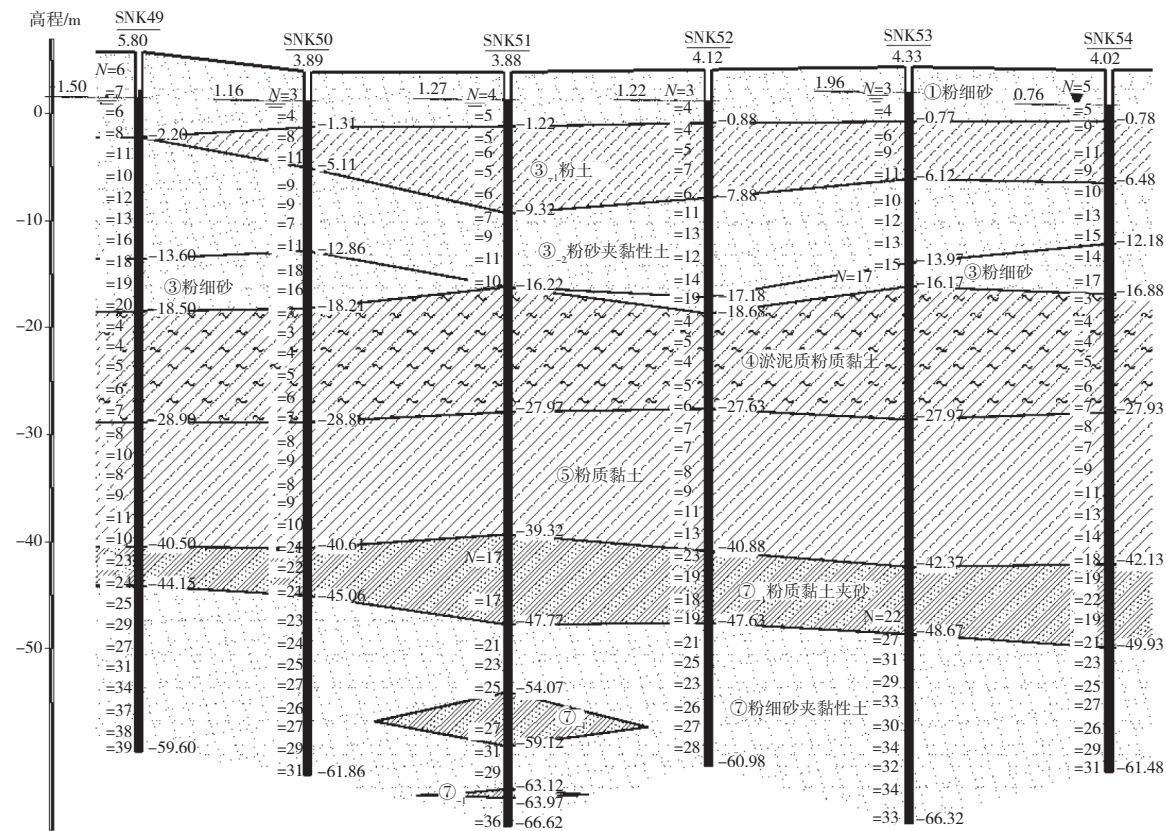


图3 工程地质典型断面

3) 工艺荷载及使用要求。

宏海号为11 000 t轨道式门式起重机，共2台。2台起重机可单独作业，也可联合吊装作业；联合作业时2台起重机主梁轴线最小间距为40 m。宏海号的控制荷载为2台起重机联合吊装作业时对基础的荷载作用（折算成线荷载）：竖向最大荷载为3 040 kN/m，横向最大荷载为 ± 174.3 kN/m（同一腿下2个作用区域，正负号表示2个区域的作用力方向相反），纵向最大荷载76.2 kN/m（与“宏海号”行走方向相反）。

根据宏海号工艺的使用要求，正常作业情况下，轨道基础最大竖向变形不大于20 mm；横向位移不大于20 mm。

2.3.2 码头结构设计

由于宏海号荷载及其使用要求的特殊性，其轨道基础结构的设计以及轨道基础结构与出运港池岸壁结构如何结合，是码头结构设计难点。经过多方案研究比较，码头结构采用宏海号轨道基础与港池驳岸结构相结合的整体卸荷式板桩码头结构。出运码头结构典型断面如图4所示。

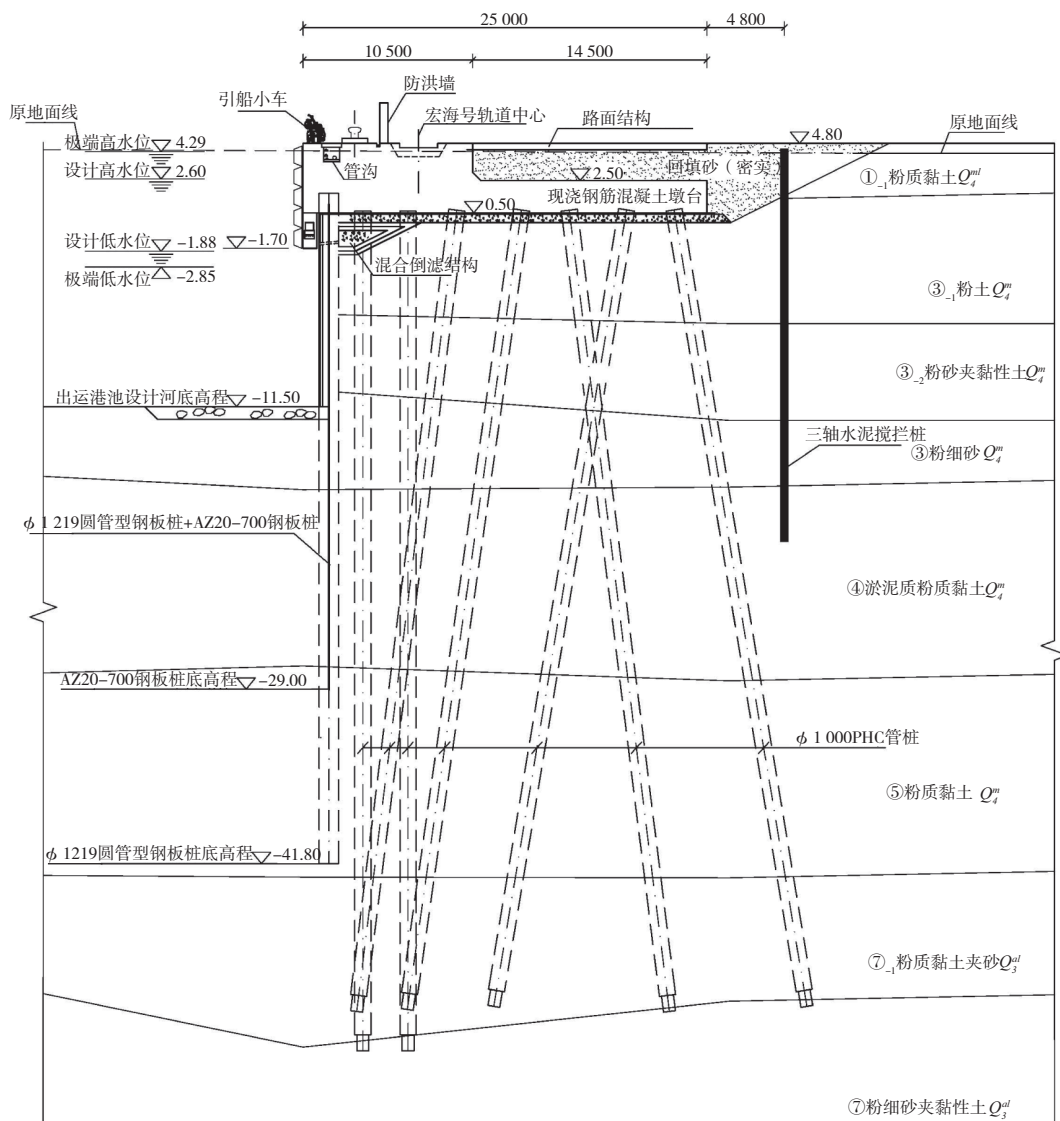


图4 码头结构典型断面

1) 卸荷式承台设计。

考虑承台承受宏海号超大的轨道荷载（垂直、水平）作用和严格使用变形控制要求，结合

桩基布置，确定承台宽度为25 m，其中前沿10.5 m区域为宏海号轨道基础区，其厚度为4.3 m，后沿14.5 m范围厚度为2 m。较宽的承台提供良好的卸

荷作用,并为承台桩基布置设计创造条件。承台纵向分段长度根据相关规范要求不宜大于35 m,考虑将结构缝设置在组合钢板桩辅桩中心位置,按照组合钢板桩的单元长度2.682 m,结构分段长度为32.18 m。

在设计中,为合理确定承台底高程,以尽可能减小板桩的水平土压力,同时考虑使承台施工可通过采取简单的降水措施能够完成。本工程区域上部地层为透水性很强的砂层,地下常水位在1.0 m左右,设计低水位为-1.88 m。综合考虑地下水位、地层等因素,确定承台底高程为0.5 m,位于地下常水位下0.5 m。

2) 桩基础设计。

① 板桩结构。

本工程区域内钻探揭示,地层自地表至-17.0 m高程主要为人工填土及粉细砂,在-17.0~-29.0 m高程为一层较厚的淤泥质粉质黏土,在-29.0~-40.0 m高程为粉质黏土。根据上述地质特征,本工程板桩需穿过底高程为-29.0 m的淤泥质粉质黏土层,板桩长度达31 m。由于本工程板桩需承受宏海号轨道基础传递的竖向荷载,并且码头结构变形满足工艺使用要求,经过对地下连续墙、钢板桩以及钢桩组合板桩等多方案的比较,设计采用钢桩组合板桩,其结构由“ $\phi 1\ 219\ \text{mm}$ 钢管桩+AZ20-700 mm钢板桩”联合组成。 $\phi 1\ 219\ \text{mm}$ 钢管桩作为主要受力结构,具有较强的抗弯能力,能够承受较大的侧向水平力;AZ20钢板桩作为辅桩具有良好的传力和互锁性,同时该结构有一定的转角适应范围,可较好的调整打桩偏差而不会出现如脱离、渗漏等问题。板桩的施工可采用陆上打桩机直接施打,施工简单。

② 墩台桩基。

墩台桩基设计需满足承受宏海号竖向荷载和水平荷载作用,同时满足荷载作用下变形控制要求,综合考虑地质条件、施工沉桩可实施性以及工程费用等因素,设计选用竖向承载力及抗弯能力较强的 $\phi 1\ 000\ \text{PHC}$ 桩作为墩台桩基。经过计算,码头前沿10.5 m范围墩台区布置2排直桩及2排斜桩,桩基横向最小间距为2.8 m,纵向最小间距

为3.0 m,其中2排斜桩为前斜桩;10.5 m以后墩台区布置3排斜桩,分别为1排前斜桩两排后斜桩,横向最小间距为3m,纵向间距在3~7 m不等。斜桩斜率最大为6:1。

结构分段桩位布置如图5所示。

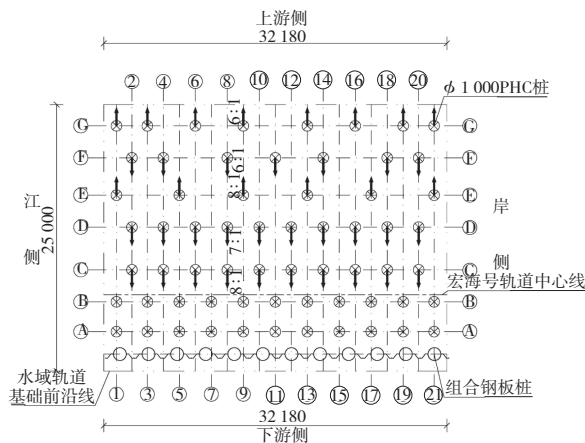


图5 结构分段桩位布置

3) 结构计算。

码头结构为超宽整体卸荷式板桩结构,墩台桩基桩距小,密度大,直桩与斜桩相互交错,有群桩效应,且对板桩墙土压力具有遮帘作用,另外,板桩墙顶嵌固在墩台上,承受墩台传递的竖向轨道荷载,板桩墙既承受较大的弯距又承受较大轴向力,码头结构受力十分复杂,其受力变形分析计算难度很大。设计采用三维有限元方法进行计算, $\phi 1\ 000\ \text{PHC}$ 桩基采用杆件单元模拟,承台结构采用实体单元建模,组合钢板桩结构采用等刚度替换的方式折算成钢管桩,然后采用杆件单元模拟。结构受力采用多种受力模型进行计算,绘制各构件在不同受力模式下的内力包络图,取其中最大包络值进行结构设计。

3 结语

1) 宏海号 $2 \times 11\ 000\ \text{t}$ 轨道门式起重机的综合性能指标居世界第一,建造后2万吨级海洋重工产品可直接吊运下水和对接,体现了“海洋装备陆地造”的理念,是海洋重工产品制造工艺、出运工艺的一次重大创新,提升了我国海洋重工产品制造实力。

2) 与宏海号 $2 \times 11\,000\text{ t}$ 轨道门式起重机出运工艺相适应的码头平面布置简单, 而码头结构设计要求高, 设计提出超宽整体卸荷式钢桩组合板桩码头, 垂直、水平承载能力高, 整体性好, 结构新型, 是板桩码头结构形式的集成创新。

3) 对于超宽整体卸荷式板桩码头, 结构受力复杂, 无成熟结构计算方法。设计将开展原型观测, 通过对施工及使用期不同阶段板桩结构的变形、内力及土压力的实测和分析, 研究该种新型结构的工作机理和计算方法, 为今后类似工程结构的设计提供依据和借鉴。

4) 本工程“ $\phi 1\,219\text{ mm}$ 钢管桩+AZ20-700 mm钢板桩”组合墙及 $\phi 1\,000\text{ PHC}$ 的桩基布置对沉桩施工提出了严格的要求, 桩位、桩的斜度及垂直度控制远远超过规范规定标准。为研究桩基沉桩施工方案, 设计与施工进行多次专题研究, 提出

了相应的沉桩施工工法, 目前沉桩施工已全部完成, 沉桩控制标准达到设计要求, 表明桩基布置具有可实施性, 通过本项目的桩基工程施工推动了沉桩工艺水平的提高。

参考文献:

- [1] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 宏华海洋油气装备(江苏)有限公司石油勘探、钻井、集输设备制造项目工程可行性研究报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2010.
- [2] 张宜群, 宋友良. 半潜式钻井平台总装合拢技术方案研究[C]// 北京: 中国造船工程学会. 第四届全国船舶与海洋工程学术会议文集, 2009.
- [3] 雷鹏. 半潜式钻井平台总装合拢新工艺[J]. 港口设计, 2012(2): 1-4.

(本文编辑 郭雪珍)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评:

随着我国海洋工程的发展, 海洋重工产品趋于大型化、重型化, 这就给大、重型海洋重工产品出运提出了新的课题。本文针对自身重达 $36\,600\text{ t}$, 高达 150 m 的门型起重机进行陆上转水上装船工艺码头结构进行了设计, 设计提出的超宽整体卸荷式钢桩组合板桩码头结构方案, 其轨道基础结构与出运港池岸壁结构相结合, 并与陆上轨道进行衔接, 结构新颖、处理恰当、理念创新。较好地解决了高大、重型海工产品整体陆上搬运与水上装船的难题。

该新型海洋重工码头设计, 其出运工艺为重大海工产品制造和出运提供了可能, 可以说是一种突破。



2014年12月

评委简历:



叶跃平, 教授级高工, 中交二航局副总工程师兼二航三公司总工程师, 中国建筑协会工程技术专家委员会委员、水运协会专业委员会委员和专家、江苏科技大学兼职教授。从事港航、市政工程施工技术及管理工 作, 发表论文10余篇, 申请专利3项, 获水运协会及航海协会科技进步奖二等奖各1项。