

· 港口 ·



超深基槽重力式码头 结构选型与设计关键技术

张炜煌

(福建省交通规划设计院, 福建 福州 350004)

摘要: 通过对一个典型超深基槽重力式码头结构选型和设计关键技术的研究, 分析了结构选型决策影响因素, 针对持力层选择、基槽开挖、基槽抛石、地基承载力保证、沉降控制等结构设计重点与难点问题提出对策措施, 为类似工程设计提供参考。

关键词: 深基槽; 厚抛石; 重力式码头; 结构选型; 结构设计; 对策措施

中图分类号: U 656.1⁺11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)04-0052-05

Key technologies of structure selection and design for ultra-deep foundation trench gravity quay

ZHANG Wei-huang

(Fujian Communications Planning & Design Institute, Fuzhou 350004, China)

Abstract: Based on the introduction and research on key technologies of structure selection and design for a typical ultra-deep foundation trench gravity quay, we analyze the main factors about structure selection, and propose countermeasures for the layer selection, foundation trench excavation, foundation trench's riprapping, bearing capacity's guaranteeing, and settlement control in the design. It can provide reference for similar engineering designs.

Key words: ultra-deep foundation trench; thick riprap; gravity quay; selection of structure; structural design; countermeasure

1 工程概况

福州港平潭港区金井作业区1[#]~5[#]泊位工程是平潭综合实验区开发重要配套项目。该项目建设5个深水泊位, 岸线长度1 647 m, 陆域面积0.835 km²。1[#]和2[#]为2个2万吨级客货滚装泊位(近期按2万DWT多用途泊位设计), 底高程-11.4 m; 3[#]为15万吨级邮轮泊位(近期按5万吨级多用途泊位设计), 底高程-15.4 m; 4[#]和5[#]为2个5万DWT多用途泊位(结构兼靠10万DWT集装箱船), 底高程-15.4 m。

2 自然条件

1) 设计波浪。

W向(横浪): 50 a一遇 $H_{1\%} = 2.05$ m, $T = 4.1$ s, $L = 26.2$ m; S向(顺浪): 50 a一遇 $H_{1\%} = 3.97$ m, $T = 9.2$ s, $L = 82.5$ m。

2) 工程地质。

码头区分为I~VI层, III~VI层土基主要物理力学指标见表1。

表1 土基主要物理力学指标

土层名称	$\rho/(t \cdot m^{-3})$	w/%	$a_{0.1-0.2}/MPa^{-1}$	$E_{s0.1-0.2}/MPa$	P_c/kPa	$\psi_q(^{\circ})$	c_q/kPa	N/击	F_{ak}/kPa
III ₁ 粉细砂	20.2	21.5	0.20	8.5		32.0	3.0	10~28	200
III ₂ 粉质黏土	19.4	26.6	0.26	7.5	294.6	15.0	32.0	11~21	140~160
III ₃ 黏土	17.8	43.6	0.42	5.8	310.4	9.5	31.5	5~11	100~140
III ₄ 中粗砂混黏性土	20.6	18.5	0.19	9.5	356.6	34.0	2.0	16~34	180~250
IV 残积砂质黏性土	19.3	23.3	0.35	5.0		20.5	14.5	12~27	200~250
V 全风化花岗岩	18.2	16.3						30~50	300~400
VI 砂土状强风化岩	22.8	2.5						>50	450~550

收稿日期: 2013-08-28

作者简介: 张炜煌(1983—), 男, 工程师, 从事港口航道工程规划设计工作。

3 码头结构选型与决策

3.1 结构选型设计难点

码头区覆盖土层厚，强风化花岗岩面高程为 -44.0 ~ -62.0 m，按常规设计经验，宜优先选用高桩结构。但工程建设存在以下难题：

1) 平潭综合实验区是中央对台工作的先行先试区，配套政策和产业发展处于探索和起步阶段。本项目是平潭近期唯一以货运为主的深水码头和水运口岸，要求码头具有较强的对货种、使用荷载和装卸工艺变化的适应性。

2) 1#和2#为客货滚装泊位，3#为邮轮泊位，总平面布置要求候船建筑物尽量靠近码头前沿；车辆接岸和旅客上下船设施设计要求合理降低码头面高程，以提高运营安全性、便捷性和舒适性。滚装船、集装箱班轮的定期准点性特点要求结构具有良好的耐久性，避免过频繁的维修导致停运、停航，造成不利经济政治影响。

3) 陆域开发空间与项目用地需求矛盾较大。

岸线前方水下地形陡峭，濒临天然深槽；岸线后方是高30~70 m的丘陵，有密集民房分布，短期拆迁难度大；4#和5#泊位远期发展为专业全集装箱泊位，需要预留足够陆域纵深。

4) 设计波浪具有波高较大、波长长、周期长、破坏力大等特征，要求结构具有较强的抗浪性能，降低施工和使用期安全风险。

3.2 结构方案比选

初步设计对重力连片式和高桩离岸式两种结构进行经济和技术比选（表2^[1]）。

重力连片式结构见图1。采用不带卸荷板的沉箱结构，主要由抛石换填、抛石基床、沉箱、胸墙、轨道基础、墙后回填料等组成。

高桩离岸式结构分为前、后桩台，桩基采用11根钢管桩，排架间距10 m，上部结构由桩帽、横梁、纵梁、轨道梁、面板等组成。码头平台通过长95~150 m栈桥与陆域相连，陆域前方设置一座驳岸。

表2 两种结构优缺点对照

结构	对荷载和工艺变化的适应性	客滚及邮轮泊位运营期的舒适性和便利性	陆域形成面积(含1#~5#)/km ²	码头结构耐久性	施工及使用期结构安全风险	疏浚量和砂石需求量	结构造价(含1#~5#)/万元
重力连片式	可承受较大的超载,适应性强	候船建筑可靠近码头前沿布置,码头面高程为9.5 m	0.835	好,使用期内维修量少	抗浪及承载能力强,较小	疏浚量和砂石需求量大	81 753
高桩离岸式	严格按设计荷载使用,适应性差	候船建筑距码头前沿较远,码头面高程为11.0 m	0.616	较差,后续维修量较大	抗浪及承载能力较差,稍大	疏浚量和砂石需求量相对较小	80 555
结论	√	√	√	√	√	△	△

注：1) 表中符号“√”表示重力式结构指标占优，“△”表示高桩式结构指标占优；2) 高桩离岸式结构将栈桥和前驳岸一并纳入码头平台结构造价统计中。

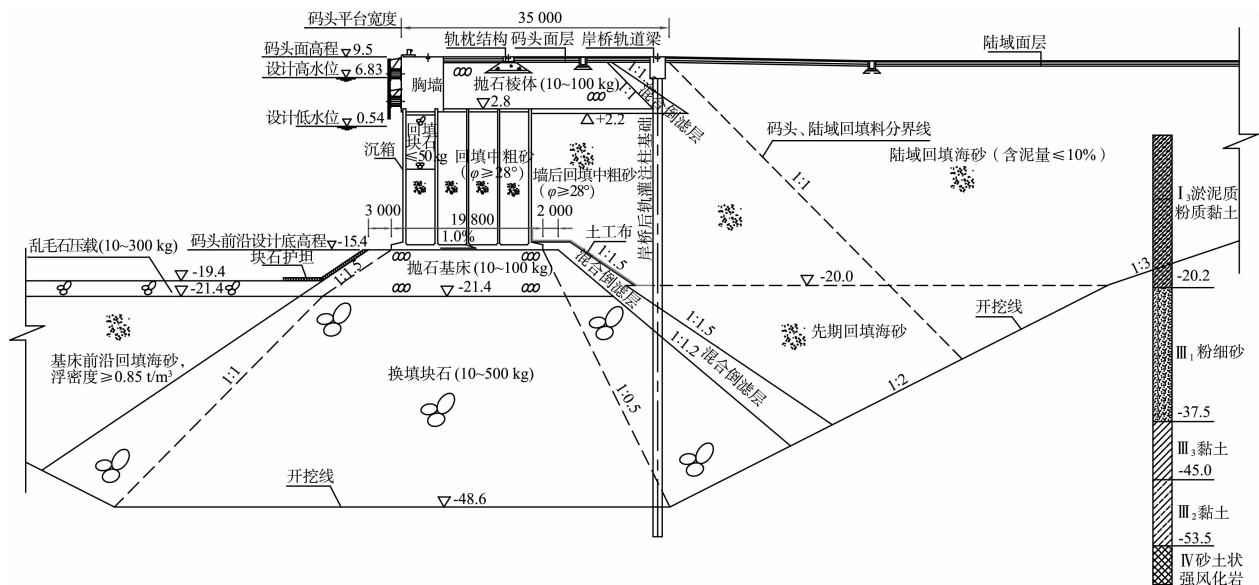


图1 3#~5#重力连片式码头结构断面

3.3 结构选型决策和方案可实施性

1) 从表2可得, 结构选型决策的7个影响因素中, 重力式结构5个要素占优, 高桩式2个要素占优, 采用重力式结构符合优选原则。

2) 重力式结构造价略大于高桩式结构。经分析, 主要原因是基槽开挖、抛石等下部基础工程量较大。分析结果还表明, 两类结构的造价差值随结构等级的增大而减小, 甚至出现“倒挂”现象。在实际施工竞标报价中, 土石方工程的报价下浮空间大于钢筋混凝土工程, 重力式结构土石方工程量大, 占总投资比例高, 在施工投标阶段有更大下浮空间, 因此实际工程投资相差不大, 还能增加0.219 km²土地资源。

3) 重力式结构具有超深基槽、超厚抛石的显著特点。基槽开挖底高程-35.0~-51.5 m, 以平均潮位3.7 m计, 基槽开挖施工最大水深38.7~55.2 m; 基槽抛石厚度23.6~40.1 m, 平均厚度31.5 m。近年同类工程实例出现后, 现行JTS 167-2—2009《重力式码头设计与施工规范》(简称“重力式规范”)已有所研究和涉及, 可以重力式规范为指导, 以类似工程建设经验为借鉴。

4) 重力式码头结构方案基槽开挖量为1 230万 m³, 基槽抛石及爆夯量为367万 m³, 海砂回填量(不含陆域回填)为380万 m³, 基槽开挖及砂、石用量大。基槽挖方可优先用于陆域吹填造地, 剩余弃方利用港址濒临外海地理优势, 运抛至较近的海上卸泥区; 后方有数座丘陵山体可作为石料场开采, 合格储量500万 m³以上, 满足持续开采和供应条件; 平潭地区砂源储量丰富, 海砂总储量超2亿 m³, 海上运距仅约10~12 km。因此, 选用重力式结构具备良好的抛泥区及砂、石地材供应依托条件。

4 码头结构设计关键技术

4.1 基础持力层设计

大型深水重力式码头宜优先选择岩基为持力层。但本工程码头区岩面埋藏深、起伏大, 若选

择岩基为持力层, 不仅增加大量基槽开挖和抛石工程量, 增加工程投资, 且恐因基床厚度差异大, 增加结构发生不均匀沉降的风险。

经设计讨论, 决定以满足下列两项计算指标为前提, 选择适合的土基为持力层: 1) 地基承载力抗力分项系数 $\gamma_R \geq 3.0$; 2) 码头断面地基平均沉降量 ≤ 15 cm。

设计研究表明, 就地基承载力而言, 随着基槽开挖深度和抛石厚度增加, 对土层指标的要求可降低, III₁~IV层均可作为候选持力层。

但从沉降控制角度而言, III₃黏土层天然含水率较高, 天然孔隙比较大, 压缩系数较大, 标贯击数较小, 土层致密性差, 断面平均沉降量计算值较大, 不宜作为持力层。

III₁粉细砂层大都位于III₃黏土层之上, 无法作为持力层。

III₂粉质黏土和III₄中粗砂混黏性土层天然含水率较低, 天然孔隙较小, 压缩系数较小, 平均标贯 $N \geq 15$ 击, 断面平均沉降计算值满足要求, 可作为持力层。

施工图设计选择III₂粉质黏土和III₄中粗砂混黏性土层为基础持力层^[2]。根据计算要求, III₂粉质黏土层按保留厚度不大于6 m控制, 在厚度较大处采取部分开挖、部分利用方案。

4.2 基槽开挖设计

1) 基槽开挖底宽设计。

基于应力扩散线分布情况, 重力式规范规定基床底宽不宜小于码头墙底宽度与2倍基床厚度之和。但若超深基槽重力式码头严格执行该条规定, 将增加多余的基槽开挖和抛石量, 增加工程投资。文献[3]指出, 抛石基床较厚时, 前趾应力沿 $1.5d_1$ 应力线扩散至基床一定厚度之后, 扩散角将逐渐接近于45°, 基床向前随深度增加的扩散宽度由 $1.5d_1$ 逐渐减小到 d_1 。文献[4]指出, 可采用非圆弧滑动及圆弧滑动的计算优化和初定开挖底宽, 再复核相关计算指标, 确定基槽开挖宽度。

在本工程设计中, 基槽开挖底宽前边线按抛

石基床层 1:1.5 和抛石换填层 1:1 进行控制, 后边线仍按 1:0.5 控制 (图 1), 每断面可减少约 14 m 开挖宽度。同时, 设计还对抗滑稳定性、地基承载力、整体圆弧滑动稳定性和沉降量等指标进行计算复核。

2) 基槽开挖断面设计。

因持力层分布不均, 土层之间相互交错, 高程起伏较大, 基槽开挖底边线以高程控制为主, 设计多为“一字形”直线。

基槽开挖采用陡边坡设计。I 层为淤泥质土层、淤泥质土和砂的混合层, 开挖坡度 1:3; II ~ III 层为黏土、粉细砂及黏土与砂的混合层, 开挖坡度 1:2。设计对基槽开挖边坡进行圆弧滑动稳定验算, 因属施工期临时开挖, 抗力分项系数 γ_R 取值适当放宽。

基槽开挖设计平均超宽取为 2 m, 平均超深取为 1 m, 实际施工表明, 现有的施工设备和技术能力可以满足该精度要求。

基槽开挖设计断面见图 2。

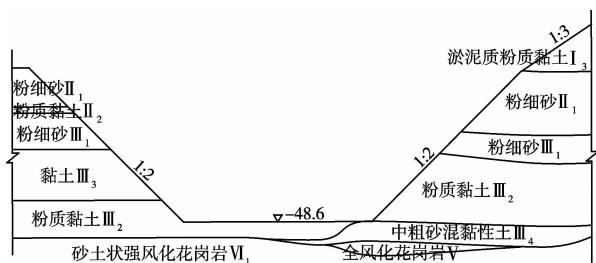


图 2 基槽开挖设计断面

4.3 基槽抛石设计

1) 基槽抛石分层设计。

重力式规范规定, 当基槽抛石较厚时, 计算确定的基床底面以下的抛石体可按地基换填处理。设计将基槽抛石划分为抛石基床和抛石换填 2 层, 块石质量分别取为 10 ~ 100 kg 和 10 ~ 500 kg (图 1)。

抛石基床预算综合单价约 64.5 元/ m^3 , 抛石换填综合单价约 54.7 元/ m^3 , 价差近 10 元/ m^3 。本工程抛石换填量约为 333 万 m^3 , 占基槽抛石总量的 90.7%, 可见基槽抛石分层设计的必要性和

对于节约投资的显著作用。

2) 抛石基床厚度设计。

根据重力式规范, 抛石基床厚度按式(1)和(2)计算确定:

$$\gamma_0 \gamma_{\sigma'} \sigma'_{\max} \leq \sigma'_R \quad (1)$$

$$\sigma'_{\max} = \frac{B_1 \sigma_{\max}}{B_1 + 2d_1} + \gamma d_1 \quad (2)$$

综合考虑应力扩散、地基承载力等因素, 基床抛石厚度最终取值为 6 m。

3) 基槽抛石夯实设计。

基槽抛石采用分层爆夯法夯实, 爆夯分层厚度按 ≤ 8 m 控制, 基床顶层爆夯后再用重锤夯两遍。设计要求按平均夯沉量 15% 进行施工控制, 并要求对后期沉降可能较大的地段增加爆夯次数。从实际施工效果来看, 平均夯沉量可达到 14.5% 以上, 基本达到了预期效果。

4.4 地基承载力和沉降量控制措施

1) 合理确定码头结构断面尺度。大型重力式码头结构断面尺度多数由基床顶面最大应力控制。因基础持力层为土基, σ_{\max} 值若定得太高, 将对地基承载力不利, 可能发生过大沉降量; 若定得太低, 则需加大结构断面底宽, 增加工程造价。设计研究决定, 码头结构断面尺度按持久状况基床顶面最大应力 $\sigma_{\max} \leq 650$ kPa 和断面地基平均沉降量 $H \leq 15$ cm 同时控制。

2) 灵活设置墙后抛石棱体。墙后 2.8 m 以下回填料采用海砂, 2.8 m 以上设置 10 ~ 100 kg 抛石棱体 (图 1)。一是有利于减小墙后土压力及倾覆力矩, 减小结构断面尺度, 减少基槽开挖、抛石量; 二是抛石棱体临水面所需稳定边坡较陡 (一般为 1:1 ~ 1:1.5), 沉箱安装后尽快将墙后填料回填至 9.5 m, 利用墙后填料进行施工期加载, 尽量消除施工沉降, 同时也方便混凝土泵车胸墙浇筑作业; 三是码头面层位于抛石棱体构成的刚性基础上, 有利于降低使用期沉降, 还可以利用抛石棱体作为下部海砂的预压荷载, 增加海砂密实性。

3) 重视边载作用研究。基床前沿三角区填料

在地基承载力和码头整体稳定性计算中具有重要作用。若该区不回填或回填厚度太小,将出现地基承载力或结构整体稳定性不足情况;若回填厚度太大,又会造成投资浪费。设计要求该区回填海砂至 -21.4 m ,要求保证海砂水下浮密度 $\geq 0.85\text{ t/m}^3$,并在其上覆盖 2 m 厚的乱毛石压载(图1),对海砂进行预压密实,同时还可防止冲刷或盗采流失影响结构安全。

4) 提出施工措施要求。基槽开挖后及时验收和抛石,防止间隔时间太久导致回淤;回淤厚度大于 0.3 m 时必须补挖,清除回淤;后期沉降可能较大的区段应增加基槽抛石爆夯次数;胸墙混凝土浇筑(特别是最后一层胸墙浇筑时)应待沉箱后填料加载至 9.5 m ,且沉降位移观测稳定后再进行;施工期应加强对沉箱、胸墙施工期间的沉降位移观测,并及时进行统计、分析和判断,作为指导施工进度依据。

4.5 主要计算结果

以 $3^\# \sim 5^\#$ 泊位为例,码头结构主要计算结果如下:抗滑验算,基床顶面抗滑力 $2\ 201.3\text{ kN/m}$,滑动力 $3\ 626.7\text{ kN/m}$,基槽底面抗滑力 $5\ 513.4\text{ kN/m}$,滑动力 $7\ 165.1\text{ kN/m}$;抗倾验算,基床顶面抗倾力矩 $21\ 299.7\text{ kN}\cdot\text{m/m}$,倾覆力矩 $53\ 185.6\text{ kN}\cdot\text{m/m}$;持久状况最大基床顶面应力 $\sigma_{\max} = 634.6\text{ kPa}$, $\sigma_{\min} = 185.0\text{ kPa}$;合力作用点与墙前趾的距离 $\xi = 7.26\text{ m}$;地基承载力抗力分项系数 $\gamma_R = 31.9$;断面平均沉降量 $H = 12.7\text{ cm}$;码头整体稳定抗力分项系数 $\gamma_R = 1.31$ 。

5 结语

1) 重力式码头耐久性好、对超载和工艺变化适应性强,设计施工简单,是一种使用广泛的结构形式。本文通过对一个典型超深基槽重力式码头结构选型及结构设计关键技术的总结与探讨,提出一些解决措施,为类似项目的选型决策与设

计提供借鉴。

2) 选用此类结构应根据项目特点综合分析后慎重决策。尤其是此类结构基槽开挖量大,砂、石需求量大,对土石方单价敏感性高,要求有充足的纳泥区和砂、石供应依托条件。

3) 结构设计重点与难点在于底部基础的处理。应优先选择土基作为持力层;基槽开挖宜采用陡边坡设计;基槽抛石应分抛石基床和抛石换填2层设计,推荐采用分层爆夯法密实;可采用优化断面尺度、灵活设置抛石棱体、发挥边载作用及提出施工措施等方法,保证地基承载力,控制沉降量。

4) 建议对重力式规范部分条文进行修编和完善。一是对此类码头结构受力状态及应力扩散方式开展研究,明确基槽开挖底宽设计方法;二是经研究论证后,对底部抛石换填层($10 \sim 500\text{ kg}$)块石质量适度放宽;三是实践表明,夯实后的基槽抛石层仍将发生少量沉降,建议对此开展研究,完善相关规定,更好指导设计施工;四是开展相关施工工艺、质量和安全保证措施的总结和研究,以利于施工推广。

参考文献:

- [1] 福建省交通规划设计院.福州港平潭港区金井作业区 $1^\# \sim 5^\#$ 泊位工程初步设计文件[R].福州:福建省交通规划设计院,2011.
- [2] 福建省交通规划设计院.福州港平潭港区金井作业区 $1^\# \sim 5^\#$ 泊位工程施工图设计文件[R].福州:福建省交通规划设计院,2012.
- [3] 金文龙.广州南沙港区二期码头结构设计难点与对策[J].水运工程,2009(7):112-117.
- [4] 卢少彦.重力式码头换填基槽开挖底宽优化设计探讨[J].工程建设与设计,2012(10):141-144.

(本文编辑 武亚庆)