



大型开敞式专业化码头建设技术创新与应用

张志明, 杨国平, 周 丰

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 总结了“十一五”期间中交水运规划设计院大型开敞式专业化码头建设技术取得的主要创新成果, 包括码头荷载计算、码头总体设计、码头新结构等方面, 并简要介绍了这些创新成果的工程应用情况, 提出了“十二五”期间需进一步深入研究的技术问题。

关键词: 大型开敞式; 专业化码头; 创新与应用

中图分类号: U 653.3⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)S1-0111-10

Technical innovation and application of large specialized open terminal

ZHANG Zhi-ming, YANG Guo-ping, ZHOU Feng

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: This paper summarizes the main innovation achievements of CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. on the construction techniques of large specialized open terminals, including the calculation of terminal loads, terminal general design, new terminal structure, etc. The engineering applications of these innovation achievements are described, and the problems needing further research are proposed during the “Twelfth Five-year Plan”.

Key words: large exposed; specialized terminal; innovation and application

进入“十一五”以来, 随着我国国民经济的快速发展, 港口吞吐量迅速增长, 大型专业化码头建设步伐加快。“十一五”期间建成投产矿石泊位42个, 货物通过能力为2.59亿 t/a; 原油泊位19个, 货物通过能力为3.06亿 t/a。布局合理、工艺先进、配套齐全的大型专业化码头, 保障了我国原油、矿石等大宗货物运输, 有力地支撑了我国社会经济的快速发展。这些大型专业化码头高水平建设与安全运营, 得益于“十一五”期间我国大型开敞式专业化码头建设技术的创新与应用。

1 码头荷载计算

1.1 波浪、水流荷载

国家“863”课题《离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术研究》^[1]对钢管桁架码头结构所

受的波浪、水流荷载进行了研究, 给出了钢管桁架码头结构杆件群中单个杆件所受波流力的遮蔽系数和杆件群总力效应系数。

表1中列出了代表不同波流工况的参数 K_{cp} ($K_{cp}=\pi S/D$, S 为波流场中水质点在一个波周期中所产生的最大位移, D 为杆件直径)对应的杆件群中单个杆件的遮蔽系数。

表1 不同 K_{cp} 下的杆件遮蔽系数

K_{cp}	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0	35.0
遮蔽系数	0.99	0.97	0.94	0.90	0.85	0.83	0.81
K_{cp}	40.0	45.0	50.0	55.0	60.0	65.0	70.0
遮蔽系数	0.79	0.75	0.70	0.67	0.64	0.63	0.61

式(1)为不同荷载条件下钢管桁架码头结构杆件群总力效应系数。

规则波及其与流联合作用下:

收稿日期: 2011-07-07

作者简介: 张志明(1962—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事港口工程设计、研究与咨询工作。

$$CG=0.969\ 33-0.001\ 96\ K_{cp}$$

不规则波及其与流联合作用下:

$$CG = 0.972\ 95-0.002\ 28\ K_{cp} \quad (1)$$

不规则波与逆流联合作用下:

$$CG = 0.908\ 11-0.001\ 14\ K_{cp}$$

另外, 该课题还首次提出了考虑不同角度的入射波和码头面板三维效应的冲击力谱零阶谱矩的计算公式^[1]:

$$m_0=f_1 \exp[-f_2(s/H_{1/3})][\rho g H_{1/3} A(H_{1/3})/L]^2 \quad (2)$$

$$f_1 = 0.072 \left(\frac{B}{L}\right)^{-0.29} \left(\frac{H_{1/3}}{d}\right)^{-2.32} \quad (3)$$

$$f_2 = 41.82 \left(\frac{B}{L}\right) \left(\frac{H_{1/3}}{d}\right) - 16.05 \left(\frac{B}{L}\right) + 7.82 \quad (4)$$

式中: B 为码头上部面板的宽度; L 为代表波长; s 为码头面板底面净空高度; $H_{1/3}$ 为入射波波高; d 为水深; A 为轻型码头上部面板的面积。码头上部面板所受的冲击力与冲击力谱存在如下关系。

波浪冲击力峰值的特征值:

$$F=0.11 \ln(m_0)^{1/2}+0.57 \quad (5)$$

波浪冲击力峰值1/2大值的平均值:

$$F_{1/2}=0.038 \ln(m_0)^{1/2}+0.176 \quad (6)$$

1.2 冰荷载

交通运输部西部交通建设科技项目(以下简称“西部课题”)《东北地区大型开敞式码头建设关键技术研究》^[2]对码头所受冰荷载进行了研究, 通过对现有冰荷载计算公式的对比分析, 推荐了适合直立桩柱冰荷载计算的计算公式, 并拓展了公式的使用范围。

作用在直立桩柱结构上的冰荷载推荐采用Afanasev公式计算, 为了适应渤海海冰的实际情况, 将Afanasev公式的适用范围从 $D/h=0 \sim 6$ 拓展到 $D/h=0 \sim 50$, 通过物理模型试验研究, 考虑接触条件系数的桩柱上水平冰力系数 $F/(Dh\sigma_c)$ 可用幂函数形式表达, 即:

$$F/(Dh\sigma_c)=2.057\ 5k(D/h)^{0.249\ 7} \quad (7)$$

式中: F 为作用在直立桩柱上的水平冰力; h 为海冰厚度; σ_c 为单轴压缩强度; D 为桩柱直径。对接触条件系数 k 仅进行了模型冰试验研究, 给出了 k

的取值范围为0.32~0.85, 供设计参考, 尚需针对低温原形冰做深入研究。

1.3 系泊船舶运动与作用力

西部课题《离岸深水港码头泊稳条件关键技术研究》^[3], 通过理论分析、数值模拟、物理模型试验和原型观测多种研究手段相结合, 首次提出了多参数系泊船舶运动量、系缆力计算公式, 并改进了已有撞击能量计算公式, 并针对不同的需要, 开发了拟动力模型系泊船舶计算软件Qmoor和时域模型系泊船舶计算软件Tmoor, 较现有商业软件功能更齐全, 模型更合理, 模拟结果更符合实际。软件可用于精确模拟计算。半理论半经验公式可用于一般模拟计算。

1) 系泊船舶运动量计算公式。

横摇公式:

$$\theta_{\text{横}}=C_r(\alpha C_{a1}+C_{a2})(H/H_0)^X(T/T_0)^Y \quad (8)$$

横移公式:

$$S_{\text{横}}=C_r(\alpha C_{a1}+C_{a2})(C_{H1}H+C_{H2})(T/T_0)^Y \quad (9)$$

纵摇公式:

$$\theta_{\text{纵}}=C_r(\alpha C_{a1}+C_{a2})(H/H_0)^X(T/T_1)^Y \quad (10)$$

纵移公式:

$$S_{\text{纵}}=C_r(\alpha C_{a1}+C_{a2})(C_{H1}H+C_{H2})(T/T_1)^Y \quad (11)$$

回转公式:

$$\theta_{\text{回}}=C_r(\alpha C_{a1}+C_{a2})(H/H_0)^X(T/T_0)^Y \quad (12)$$

升沉公式:

$$S_{\text{升}}=C_r(\alpha C_{a1}+C_{a2})(C_{H1}H+C_{H2})(T/T_0)^Y \quad (13)$$

2) 系泊船舶系缆力计算公式。

①纯波浪作用、波流联合作用下各系缆力公式。

艏缆缆力公式:

$$F=C_r(C_{a1}\alpha+C_{a2})(C_{\beta1}\beta+C_{\beta2})(C_{H1}H+C_{H2}) \cdot (C_{T1}T+C_{T2})M/T_0^3 \quad (14)$$

艉缆缆力公式:

$$F=C_r(C_{a1}\alpha+C_{a2})(C_{\beta1}\beta+C_{\beta2})(C_{H1}H+C_{H2}) \cdot (C_{T1}T+C_{T2})M/T_0^3 \quad (15)$$

艏横缆力公式:

$$F=C_r(C_{Lb/L1}L_b/L+C_{Lb/L2})(C_{a1}\alpha+C_{a2})(C_{\beta1}\beta+C_{\beta2}) \cdot (C_{H1}H+C_{H2})(C_{T1}T+C_{T2})M/T_0^3 \quad (16)$$

艏横缆力公式:

$$F=C_r(C_{Lb/L1}L_b/L+C_{Lb/L2})(C_{\alpha1}\alpha+C_{\alpha2})(C_{\beta1}\beta+C_{\beta2}) \cdot (C_{H1}H+C_{H2})(C_{T1}T+C_{T2})M/T_0^3 \quad (17)$$

艉倒缆力公式:

$$F=C_r(C_{Lb/L1}L_b/L+C_{Lb/L2})(C_{\alpha1}\alpha+C_{\alpha2})(C_{H1}H+C_{H2}) \cdot (C_{T1}T+C_{T2})M/T_0^3 \quad (18)$$

艏倒缆力公式:

$$F=C_r(C_{Lb/L1}L_b/L+C_{Lb/L2})(C_{\alpha1}\alpha+C_{\alpha2}) \cdot (C_{H1}H+C_{H2})(C_{T1}T+C_{T2})M/T_0^3 \quad (19)$$

②纯流作用下各系缆力公式形式相同, 如下式所示, 不同缆绳式中所取参数不同。

$$F=C_r(C_{Lb/L1}L_b/L+C_{Lb/L2})(C_{\gamma1}\gamma+C_{\gamma2})(C_{v1}v+C_{v2})M/T_0 \quad (20)$$

3) 系泊船舶撞击能量计算公式。

$$E=C_r(C_{\alpha1}\alpha+C_{\alpha2})(C_{H1}H^2+C_{H2})(C_{T1}T+C_{T2})M/T_0^3 \quad (21)$$

以上公式中 M 为船舶质量; H 为波高; H_0 为船舶吃水; T 为波浪周期; T_0 为船舶横摇周期; T_1 为船舶纵摇周期; α 为波浪入射角度 (横浪为 90°); β 为缆绳角度 (码头轴线与缆绳夹角); γ 为潮流流向与码头轴线夹角; L_b/L 为泊位长度与船长的比值; $C_r, C_{\alpha1}, C_{\alpha2}, C_{H1}, C_{H2}, C_{T1}, C_{T2}, C_{Lb/L1}, C_{Lb/L2}, C_{\gamma1}, C_{\gamma2}, C_{v1}, C_{v2}$ 为相关参数。

上述多参数系泊船舶运动量、系缆力、船舶撞击能量计算公式, 适用于任意方向的波浪、水流单独作用及联合作用, 为在设计阶段准确掌握系泊巨型船舶在浪、流联合作用下的运动规律、优化码头设计提供了有力手段, 有效降低了码头建设风险。

2 码头总体设计

2.1 码头轴线确定

码头的轴线方向宜与风、浪、水流的主导方向一致, 当无法同时满足时, 应服从其主要影响因素。在近岸开敞海域, 水流方向通常与等深线一致, 而波浪方向通常与等深线垂直, 码头轴线无法同时满足与水流和波浪方向要求。对于满载大船, 水流是主要影响因素, 此时应主要根据水流方向确定码头轴线。

西部课题《离岸深水港码头泊稳条件关键技术研究》^[3]提出对于受潮汐影响较大的码头, 水流

对码头轴线方位确定的影响, 码头轴线应该在横向水流分量最小的轴线方位或附近, 研究给出了根据大、中、小潮涨落特征得到码头轴线大致方位的计算方法, 见式 (22), 及根据全潮逐时潮流分量最小原则精细计算码头轴线方位的方法。

码头轴线方位方程:

$$v_1 \sin(\theta_1 - \theta) = v_2 \sin(\theta_2 - \theta) \quad (22)$$

式中: θ 为码头轴线方位; v_1 为潮流涨急最大流速; θ_1 为潮流涨急流向; v_2 为潮流落急最大流速; θ_2 为潮流落急流向。

北方冰冻地区码头的位置及其轴线的方位尚应考虑冰的作用。确定码头轴线的控制性因素、主要影响因素和次要影响因素时, 应论证在不同码头方位和船舶装载量情况下风、浪、流对船舶作业条件的影响。

注意, 最理想的码头轴线是船舶靠离泊, 特别是船舶重载靠离泊时, 略微处于开流状态, 这种情况对码头和船舶较为安全。

2.2 泊位长度

JTJ 211—1999《海港总平面设计规范》修订工作对码头泊位长度进行了专题研究, 对码头泊位长度提出以下修改意见:

1) 开敞式大型原油泊位与 LNG 泊位大多采用蝶形布置, 推荐单泊位长度为 $L_b = L + 2d_0$, 富裕长度 d_0 为 $B/4 \sim B/2$, B 为设计船型宽度, 见图 1。这样, L_b 接近于 $1.1L \sim 1.2L$, 此数值与国际上认可的相关规范比较一致。对于蝶形布置连续泊位, 其端部泊位长度推荐 $L_b = L + d + d_0$, 中间泊位 $L_b = L + 2d$, 中间富裕长度 d 为 $B/2$, 端部富裕长度 d_0 为 $B/4 \sim B/2$, 见图 2。对于墩式码头, 泊位长度指艏、艉缆墩中轴线间的距离, 单泊位全长还要加上半个艏缆墩和半个艉缆墩的结构尺度, 端部泊位全长还要加上半个艏缆墩或艉缆墩的结构尺度。

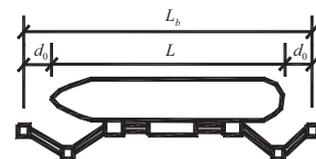


图1 蝶形布置单泊位长度

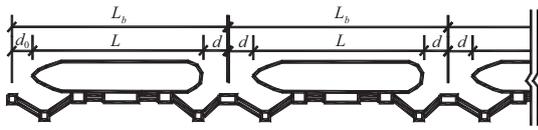


图2 蝶形布置连续泊位长度

2) 开敞式大型矿石泊位和煤炭泊位大多采用“一”字形布置,其单个泊位长度宜采用 $L_b=L+2d_0$, d_0 为 $B/2 \sim B$,见图3, L_b 接近于 $1.2L \sim 1.4L$ 。对于“一”字形布置连续泊位,其端部泊位长度推荐 $L_b=L+d+d_0$,中间泊位 $L_b=L+2d$,中间富裕长度 d 为 $B/2$,端部富裕长度 d_0 为 $B/2 \sim B$,见图4。除满足上述系缆要求外,还需满足装卸工业设备作业、检修的特殊要求。

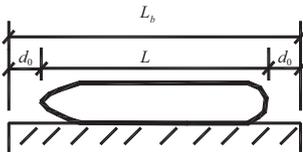


图3 “一”字形布置单泊位长度

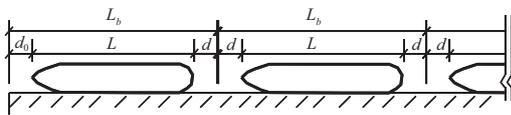


图4 “一”字形布置连续泊位长度

3) 有掩护码头泊位长度确定完全可以统一到开敞式“一”字形布置泊位长度确定方法。

4) 当同一码头线上连续布置3个及以上泊位时,码头总长度宜根据各个靠泊船舶尺度组合情况,优化选用。

西部课题《离岸深水港码头泊稳条件关键技术研究》^[3]综合各种研究手段对码头泊位长度的研究表明,泊位长度与船长之比约为 $1.2 \sim 1.4$ 时对于控制船舶的综合运动量以增加装卸效率较为合理,以横向力为主取小值,以纵向力为主取大值。

2.3 码头面高程

码头面高程的确定标准有两个:一是上水标准,即码头上水是控制因素,码头上部结构所受波浪力不是控制因素;另一个是波浪受力标准,即码头上部结构所受波浪力是控制因素。

码头面高程可统一由设计水位、码头前最大波峰面高度、码头上部结构不允许承受波浪力部

分的高度和一定的富裕高度组成。如取上水标准控制,设计水位取设计高水位,波高可取 $10a, 15a$ 或 $20a$ —遇 $H_{13\%}$;如取波浪受力标准控制,设计水位取设计高水位与极端高水位之间某水位,波高可取 $50a$ —遇 $H_{1\%}$ 。当码头面允许上浪和码头上部结构允许承受一定波浪浮托均布力时,波峰面高度参数用设计水位至对应码头上部结构底面距离替代,注意上部结构允许承受的波浪浮托均布力不取最大值,而是取码头适当位置、码头宽度一定范围内平均值。码头上部结构高度取为不允许承受波浪力部分的高度。设计水位如取极端高水位,富裕高度可取为零。

平面规范中没有给出静水面以上波峰面高度 η 的计算式,在JTJ 213—1998《海港水文规范》的8.3.2.1中有波浪作用于桩基和墩柱建筑物上时波峰在静水面以上的高度 η_{max} ,建议取 $\eta=\eta_{max}$,用查图的方法确定,查出的 η 值是桩柱上的波峰面。此公式对大直径墩柱不适用;对高桩码头,未考虑上部梁板作用,计算精度受到影响。

鉴于确定码头前最大波峰面高度的重要性,理论结合试验给出了圆沉箱、准椭圆沉箱重力墩式码头和波流共同作用下高桩码头前沿简单适用的波峰面高度计算公式。

1) 圆沉箱、准椭圆沉箱重力墩式码头前沿波峰面高度计算公式^[4]。

根据线性微幅波理论和波能流守恒,推导了单圆墩码头前沿波峰面高度近似解析解,并通过物理模型实验数据对理论值进行了修正,得到单墩、单排墩和双排墩波峰面高度计算公式如下:

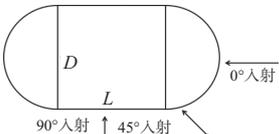
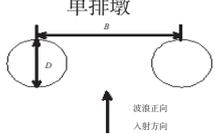
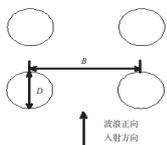
$$\eta = h_s + kH_i \tag{23}$$

式中: η 为波峰面高度; h_s 为因波浪非线性而引起的波浪超高; H_i 为入射波波高; k 为波峰面高度参数,取值见表2。

2) 波流共同作用下高桩码头前沿波峰面高度计算公式。

西部课题《离岸深水港码头重力式复合结构和嵌岩全直桩结构关键技术》^[5],推导了波浪正向入射时高桩码头前沿波峰面高度近似解析解,公

表2 单墩、单排墩和双排墩波峰面高度参数

墩型	规则波	不规则波
单圆墩	0.741	
 准椭圆单墩 (L/D=0.7)	0° 入射角	0.834
	45° 入射角	0.881
	90° 入射角	0.969
 单排墩	B/D ≤ 2.0	1.000
	B/D = 2.5	0.945
	B/D = 3.0	0.869
	B/D = 4.0	0.814
	B/D > 4.5	0.741
 双排墩	为对应单排墩相同B/D的1.25倍, 若k大于1.000, 则取1.000	

式为:

$$\eta_0 = \frac{H}{2} + \frac{\pi H^2}{2L} \left[\frac{(\operatorname{ch} \frac{4\pi d}{L} + 2) \operatorname{ch} \frac{2\pi d}{L}}{4(\operatorname{sh} \frac{2\pi d}{L})^3} \right] \quad (24)$$

$$H_t = H_0 \sqrt{\frac{\sinh 2k(d + \eta) - \sinh 2k(d - l) + 2k(\eta + l)}{2kd + \sinh(2kd)}} \quad (25)$$

$$H = H_t + H_r \quad (26)$$

式中: H_t 为入射波高; H_r 为反射波高; k 为波数, $k = \frac{2\pi}{L}$; d 为水深; l 为码头挡板入水深度; L 为波长; η 为行进波峰面高度; η_0 为波浪正向入射时高桩码头前沿波峰面高度。

通过物理模型试验, 得到任意方向波浪、水流共同作用下接岸式高桩码头与离岸式高桩码头均适用的码头前沿波峰面高度的计算公式:

$$\eta_{\beta,u} = \eta_0 K_{\beta,u} \quad (27)$$

式中: $\eta_{\beta,u}$ 为同波浪入射角和流速时码头前沿波峰面高度。

高桩码头前沿波峰面高度影响系数的计算表达式为:

$$K_{\beta,u} = \left[1 - 0.2 \operatorname{th} \left(\frac{u}{C} \frac{90 - \alpha}{2\pi} \right) \right] \left[1 + \cos^2 \left(\frac{2\pi\beta}{360} \right) \right] / 2 \quad (28)$$

式中: β 为波浪入射角; α 为波流夹角; u 为水流速度; C 为波浪传播速度。

2.4 作业标准

西部课题《离岸深水港码头泊稳条件关键技术研究》^[5]全面调研了国际航运协会及主要发达国家以船舶运动量表示的作业标准, 选取国内代表性码头进行针对性研究, 并经广泛考察调研, 首次提出了以船舶运动量表示的我国港口装卸作业标准, 见表3。该标准考虑不同货种和装卸工艺设备对船舶允许运动量的限制, 可有效指导船舶安全装卸作业, 克服了以波高等环境要素表示的粗放型作业标准的缺陷, 既提高了码头船舶作业安全性, 又提高了装卸效率。

表3 离岸深水大型码头以船舶运动量表示的作业标准

船型	装卸设备	纵移/m	横移/m	升沉/m	纵摇/(°)	横摇/(°)	回转/(°)
干散货船(矿石、煤炭)	抓斗卸船机	± 1.5	± 1.0	± 0.5	± 3.0	± 3.0	± 1.0
	装船机	± 2.5	± 1.5				
油船	输油臂	± 1.5	± 1.5				
集装箱船	集装箱岸桥	± 0.5	± 0.3	± 0.3	± 0.5	± 1.5	± 0.5

3 码头新结构

3.1 钢管桁架结构

国家“863”课题《离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术研究》^[1]提出了适合深水、大浪、流急及岩基浅埋条件下的钢管桁架码头新型结构。在钢管桁架结构码头中，靠船墩受力最具代表性，以单个靠船墩为对象具体说明各部分组成。

1) 钢管桁架主体结构。

主体结构为透空式钢管桁架，如图5所示。平面布置、装卸工艺和使用荷载是决定其平面尺度的重要因素。主体结构竖向钢管（桩）的间距应与工艺装卸设备的轨距和使用荷载相适应，并考虑上部梁板结构经济合理的跨度。



图5 透空式钢管桁架主体结构

2) 钢管桁架码头基础结构。

在岩基浅埋条件下，由于嵌岩结构受力合理，施工速度快，投资低，在工程界得到广泛关注。该课题新提出的钢管混凝土芯柱嵌岩技术，结构如图6所示，解决了港口工程中承受巨大水平力的码头结构如何能有效可靠地嵌固连接在浅埋

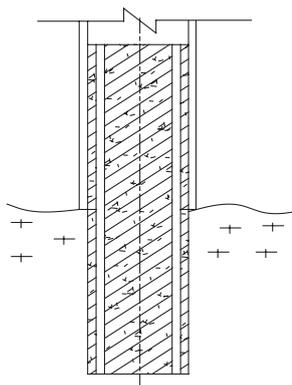


图6 钢管混凝土芯柱嵌岩结构

岩基的关键难题。对于抗拉有较高要求的工程，在钢管混凝土芯柱嵌岩的基础上可以增加锚杆，形成复合嵌岩的结构形式。

3) 上部结构。

靠船墩上部采用梁板形式的钢结构。由于码头顶高程较低，为减小波浪对上部面板的冲击力，顶部钢板设计成不满铺且可拆卸。上部通过与桁架主管相连的钢梁形成框架，钢梁上铺厚花纹钢板，钢板下设必要的工字形纵梁。连接各墩间的人行桥在桁架主管和钢梁上设桥支座，见图7。

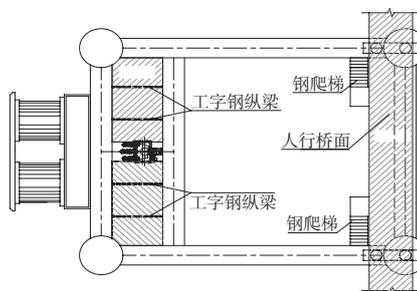


图7 靠船墩码头上部结构

钢管桁架结构作为一种全新的码头结构,国家“863”课题《离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术研究》^[1]提出了完整的设计计算方法，主要包括码头结构主尺度确定原则与方法、静力动力计算方法、结构疲劳计算方法、整体稳定计算方法等，特别是提出了钢管桁架结构杆件稳定的简化计算公式，如式（29）。

$$P = \varphi A f_y \tag{29}$$

式中： P 为杆件的稳定承载力； φ 为稳定系数，计算公式为：

$$\varphi = 1.0673 - 0.0034\lambda - 0.0069[\beta_m M_1 / (f_y W)] \tag{30}$$

式中： λ 为所计算构件段范围内构件在弯矩作用平面上的长细比； β_m 为等效弯矩系数； M_1 为作用于杆件的两个弯矩中的较大弯矩； f_y 为屈服强度； W 为截面模量。

3.2 重力式复合结构

西部课题《离岸深水港码头重力式复合结构和嵌岩全直桩结构关键技术》^[5]提出了重力式复合结构。该结构上部透空部分由钢管桩和混凝土墩台组成；下部基础部分为钢筋混凝土沉箱结构，

箱内填砂石; 上部钢管桩与下部重力基础固接, 施工时陆上整体制作, 水上一次安装。

复合式码头结构形式可根据上部透空桩柱的布置不同分为直桩结构和斜桩结构2种。

1) 直桩结构。

下部沉箱结构顶部为混凝土或钢筋混凝土实体结构。其中直接固定钢管桩结构的仓格, 其上部为钢筋混凝土基础, 在沉箱结构预制时同时浇筑; 其余仓格的上部为混凝土结构, 在主体结构安装就位后水上浇筑; 沉箱下部填10~100 kg块

石。沉箱上全部布置直桩, 为保证结构的刚度, 钢管桩内灌注混凝土。沉箱与钢管桩形成整体; 钢管桩上部由钢筋混凝土墩台连成整体, 现场浇筑。它的特点是既减少了所受的大部分波浪力和水流力, 施工也较方便, 但上部为直桩, 桩应力较大, 钢材用量较大。如图8所示。

2) 斜桩结构。

斜桩-重力式复合结构下部的沉箱同全直桩-重力式复合结构, 沉箱上布置有直桩和斜桩 (图9)。

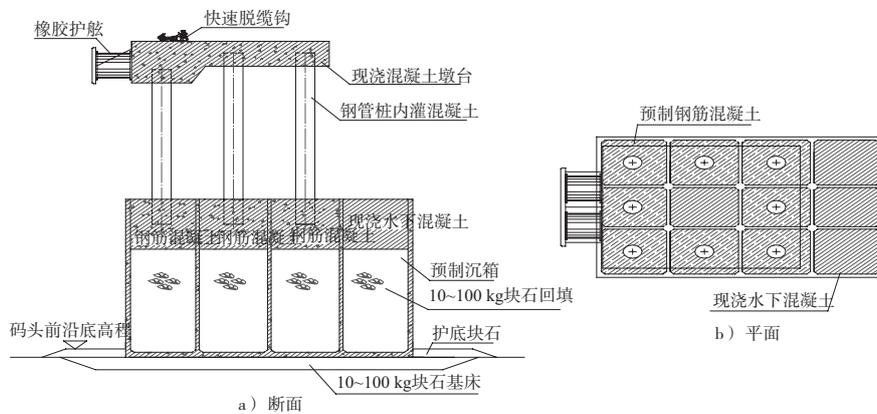


图8 重力式复合直桩结构

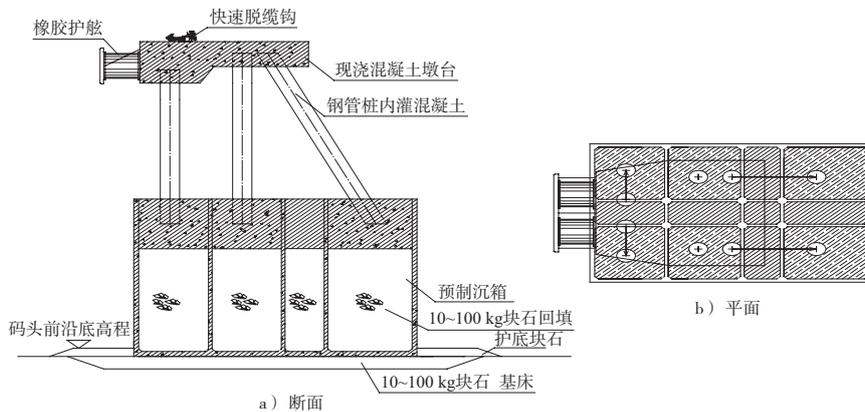


图9 重力式复合斜桩结构

一般情况下, 在前仓布置2根斜桩, 倾斜方向平行码头前沿线; 在中仓布置直桩; 在后仓布置斜桩, 倾斜方向垂直码头前沿线。它的特点是既减少了所受的大部分波浪力和水流力, 又充分利用斜桩承受水平力, 桩柱应力较小, 钢材用量较少。

西部课题《离岸深水港码头重力式复合结构和嵌岩全直桩结构关键技术》^[5]对重力式复合码头结构提出了结构断面尺寸的确定方法、结构构

造要求、静动力计算方法等完整的设计计算方法。其中, 沉箱结构与桩柱结构分界点的位置即沉箱顶高程的确定, 是重力式复合结构码头设计优化的关键, 其焦点是要合理降低作用在整个结构上的波浪力。当沉箱高度过高时, 结构所受的波浪力将明显增大, 在作用荷载中起控制作用, 导致结构的整体断面增大; 而当沉箱高度过低时, 虽然波浪力有所减小, 但桩身长度加大, 桩

端节点受力加大,提高了对桩和沉箱混凝土连接节点强度和构造措施的要求和难度。因此,沉箱顶高程的确定需考虑多方面的影响因素,包括波浪力的影响和结构各构件强度、稳定性的限制条件及构造要求。该课题通过物理模型试验,提出桩柱结构与沉箱结构合理分界点的计算公式为:

$$E_c = LLWL - H_{1\%} \quad (31)$$

式中: E_c 为沉箱结构顶部高程,即分界点高程; $LLWL$ 为极端低水位; $H_{1\%}$ 为50 a重现期的 $H_{1\%}$ 波高。

3.3 嵌岩全直桩结构

嵌岩全直桩码头是建造在覆盖层较薄的岩石地基上的主要桩基结构形式。它的基本组成通常可分为3个部分:上部结构、桩基和接岸结构,如图10。其主要特点是位于海中部分结构体积小,所受波浪、水流力小;依靠结构自身受力且受力合理,随着码头水深的增加,造价增幅不大;施工期桩受力较小;结构自身能吸收部分船舶撞击能量;全直桩的最大弯矩产生在桩顶和桩下部嵌固处,为等强度设计提供了有利条件;施工工序简单,相对于重力式码头,省略了基槽挖泥、基床抛石和夯实等施工工序。

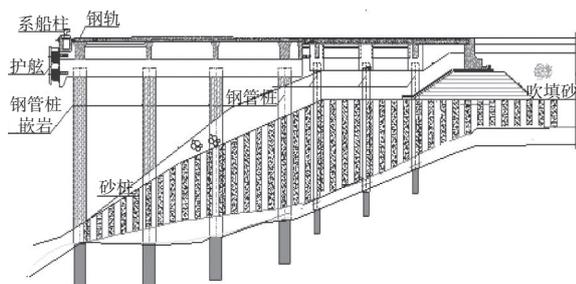


图10 嵌岩全直桩码头典型断面

西部课题《离岸深水港码头重力式复合结构和嵌岩全直桩结构关键技术》^[5]在对嵌岩全直桩结构设计计算方法的研究中,通过开发嵌岩桩专用的桩结构杆单元、改进水平力在横向排架中分配系数计算方法,将六维计算简化为三维计算,提出了比现行规范更可靠、更精确的嵌岩全直桩码头结构静、动力空间简化计算方法。此外,该课题还对全直桩码头的温度应力进行了深入研究,认为在上部结构封合后,结构整体温差对基桩产生的内力中,

梁系、面板温差产生的影响是主要的。在桩身温差作用下,桩顶水平位移、侧向剪力和弯矩较小,桩基对上部结构伸缩的约束作用可以忽略不计,温变后上部结构的形状不变,并基于梁板系自由温差假设提出了嵌岩全直桩码头结构温度应力的计算模式,并给出了相应的简化计算方法。

研究表明,某些情况,如桩的水平刚度较大,且排架前后桩刚度相差较大时,温度应力有可能是控制情况。

4 创新技术应用实例

4.1 青岛港45万t原油码头工程

青岛港45万t原油码头(图11)工程是目前亚洲最大吨级的码头之一,也是国内第1个可以停靠10万~45万t油轮的码头,创造了原油码头吨级、接卸能力、码头前沿水深、混凝土引桥跨度、沉箱高度、输油管线直径、卸船效率等多项最新记录。



图11 青岛港45万t原油码头

该工程在设计中充分利用了相关科研成果,优化了码头轴线位置与方位、码头长度、系靠墩布置以及码头面高程等,节约了宝贵的深水港口岸线和工程投资,方便了使用,提高了安全性。

码头工作平台、4个靠船墩和北侧的3个系缆墩采用重力式圆沉箱结构,南侧的3个系缆墩采用高桩墩台结构,采用2种结构形式很好地适应了基岩面起伏变化大的复杂地质条件,节省了工程投资。连接码头和陆域的引桥桥面结构创新采用了预应力混凝土变截面连续箱型梁结构,具有跨度大(单跨80 m)、桥墩数量较少、投资省、维护量小、造型美观等优点,首次在大型原油码头接岸引桥中成功采用。

工艺系统实现了10万~45万t泊位卸船、输油臂排空、水域管线泄空、管线循环等作业流程,采用DN500液压输油臂,卸船效率最大可达21 000 m³/h。采用多项先进自控技术,设置了全面的安全和应急功能,包括输运自动控制系统、仪表检测及报警系统、消防自动控制系统、工业电视监控系统及给水防冻控制系统,整个系统采用了先进的PLC控制、计算机监控,实现了火灾自动报警、自动灭火系统控制,实现了消防和工艺流程控制的远距离监控和操作,实现了输油臂超限监测、报警,ERC关闭及脱离、工艺阀门连锁切断、温度、压力在线监测等功能。

采取了溢油事故防治、污水防治、大气污染防治对策措施、噪声污染防治多项环保措施,配置了环保船,效果良好。

4.2 青岛港40万t矿石码头工程

该工程新建40万t卸船泊位1个,码头设计水深25.6 m,长度510 m,通过能力达到2 500 t/a。该工程为世界最大且为首座40万t矿石接卸码头,见图12。



图12 青岛港40万t矿石码头

码头为开敞式布置,充分利用了宝贵的深水岸线。码头轴线、长度、高程以及泊稳条件的确定充分利用了最新科研成果,突破了现有规范,提高了安全性,降低了投资。码头平台下设系缆平台,加长横缆长度,解决了“一”字型码头横缆短的关键技术问题,提高了系泊的安全性和装卸作业效率。

采用现代物流港的设计理念,实现码头、堆场、集疏运无缝、高效衔接,环保节能。该码头为近年新建的世界效率最高的矿石码头,抓斗卸

船机规格3 500 t/h,皮带机额定能力为10 500 t/h。

码头结构创新性采用重力式椭圆沉箱,1个墩只设1个沉箱;码头、引桥上部采用大跨度预应力混凝土结构,安全可靠,投资省,耐久性好。

节能方面,装卸工艺流程顺畅、合理;采用节能型设备;矿石转水实现直取;集疏运实现无缝、高效衔接。

环保方面,火车和汽车装车分别采用了特别环保的火车装车楼和汽车装车楼;矿石堆场封闭,设抑尘网;所有转运站均设干式、湿式联合除尘;出堆场汽车洗车;堆场雨水收集,中水利用,做到零排放;堆场周边绿化。

4.3 其它工程

重力式复合码头结构在大连LNG码头和日照岚山港区30万吨级原油码头工程的系缆墩结构中成功应用,减小了结构所受波浪力,降低了结构顶面高程,方便施工,节省了工程投资。嵌岩全直桩码头结构在宁波港北仑港区五期集装箱码头工程中成功应用,解决了岩基起伏剧烈情况下的码头建设难题,采用了嵌岩全直桩码头静力、动力简化计算方法以及温度应力计算方法,为工程设计人员节省宝贵时间的同时,还提高了工程的安全性。

另外,国家“863”课题《离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术研究》^[1]提出的适合深水、大浪、流急及岩基浅埋条件下的钢管桁架码头新型结构,作为一种全新的结构形式已被选定为日照岚山原油码头二期工程码头主体结构,其安全性和经济性都将优于传统码头结构,并将进一步在其他工程中推广应用。

5 结语

“十一五”期间,中交水运规划设计院在大型开敞式专业化码头荷载计算、总体设计、码头新型结构等方面取得了多项创新成果,已初步形成了系统的、总体具有国际领先或先进水平的大型开敞式专业化码头建设技术,部分成果已在我国大型港口建设中应用,并取得良好社会经济

效益。这对实现我国沿海港口新的跨越式发展，保证国民经济持续稳定发展，具有十分重大的意义；对提升我国港口建设的国际竞争力，实现走出去战略亦有重要意义。

“十二五”期间，我国大型开敞式专业化码头建设技术，还需统一系泊船舶物理模型试验的试验、测量、统计、分析等方法，提高试验成果的可比性与通用性，还需加强原型观测，累计资料，建立完整的系泊船舶运动响应物模试验以及原型观测数据库，不断改进系泊船舶动力响应计算理论与方法，提高数模计算精度和实用性；持续开展有代表性混凝土结构耐久性室外暴露试验工作，重点由对混凝土材料耐久性研究转变为结合结构受力特点、几何形状的结构物耐久性研究，不断完善混凝土结构健康诊断与寿命预测技术；需积极推广应用钢管桁架结构、重力式复合结构和嵌岩全直桩结构等，并注意进一步总结提升。

参考文献：

- [1] 张志明, 孙昭晨, 杨国平, 等. 离岸深水港岩基浅埋轻型结构码头建造技术研究[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2010.
- [2] 张志明, 郑宝友, 徐健, 等. 东北地区大型开敞式码头建设关键技术研究[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2008.
- [3] 张志明, 杨国平, 文立, 等. 离岸深水港码头泊稳条件关键技术研究[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2010.
- [4] 张志明, 朱小松, 周丰. 波浪作用下大型开敞式圆沉箱墩式码头前波峰面高度研究[J]. 中国港湾建设, 2011(3): 20-26.
- [5] 张志明, 李元青, 徐健, 等. 离岸深水港码头重力式复合结构和嵌岩全直桩结构关键技术研究[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2010.

(本文编辑 武亚庆)

《水运工程》优秀论文评选

评委点评：

大型专业化码头多建在自然条件相对恶劣的环境，码头具有开敞式、结构受力复杂、影响因素多等特点，目前现有建设标准尚不能完全解决大型开敞式专业化码头建设在技术上存在的问题和挑战。

作者总结了近年来中交水运规划设计院有限公司在大型开敞式专业化码头关键技术研究取得的主要创新成果，特别是在码头总体设计、波流联合荷载作用、系泊船舶运动与作用力、新结构和作业标准等方面进行的探索与实践。文章试图表达我国已解决了大型开敞式专业化码头建设所面临的挑战和技术难题，并提出了今后还需深入研究的问题。

文章对我国建设布局合理、结构经济安全和技术领先的大型开敞式专业化码头具有较好的指导和借鉴意义，也为今后相关新建设标准的制定提供了案例。



2012年12月

评委简介：

李勇谦，高工，福建省交通规划设计院港湾工程设计所总工程师。

审查和负责承担过的主要设计项目：可门电厂专用煤码头（省一等奖）、江阴电厂专用煤码头（省一等奖）、南埔电厂专用煤码头（部三等奖）、江阴4[#]~9[#]泊位集装箱码头、祥芝中心渔港工程、BP（福建）液化石油气码头（省三等奖）、福州港散货（河沙）码头（部三等奖）、福州台泥水泥码头（省二等奖）、泉州港围头十万吨级集装箱码头、秀屿港区木材专用码头、东吴港区东1、东2、4[#]~6[#]泊位（5万~15万吨级）、湄洲湾港口控制性详细规划、漳州港总体规划等。