

一种创新的码头结构新形式 ——整体箱板式高桩码头结构设计与施工技术

邴 晓¹, 邱大洪^{1,2}, 仝成才¹, 苏 萍¹

(1. 大连理工大学 土木建筑设计院有限公司, 辽宁 大连 116024; 2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 阐述了传统高桩码头结构在耐久性、整体性方面存在的主要问题, 针对问题提出了几个新的设计理念, 并据此设计了一个创新的码头结构方案。其要点是上部结构采用双向预应力整体箱板结构, 桩基采用全直桩基础。上部结构沿码头纵向分段拼装, 按短线匹配法箱梁预制施工技术进行设计, 在纵向分段预制时形成横向无粘结预应力构件, 预制的纵向分段在桩基上安装后, 在预留的孔洞及管道中进行预应力张拉, 形成纵向粘结预应力。在整体箱板与桩基连接处, 采用三向预应力纤维混凝土。施工完成后, 一个标准段码头的上部结构形成一个整体箱板。文中通过2个案例, 从设计、施工、工程量及经济指标等方面论证了本方案的优越性及其推广应用价值。

关 键 词: 整体箱板式高桩码头; 上部结构耐久性; 设计理念

中图分类号: U656.113

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2009)04-0143-08

高桩结构是码头工程普遍采用的一种结构形式, 主要由桩基和上部结构组成。桩基技术发展较快, 但高桩码头上部结构技术发展缓慢, 因此可供选择的结构形式较少。经过几十年的工程实践表明, 传统的高桩结构存在以下问题: ①码头上部结构底面边界复杂, 有许多可以积聚盐雾潮湿空气的空间, 耐久性差, 使用寿命短; ②码头上部结构由横梁、纵梁、板等多层梁板结构组成, 横梁搁置在现浇钢筋混凝土桩帽上, 整体性差, 刚度较小, 且该类梁板系统很难应用双向预应力技术; ③上部结构高度大, 为避免波浪上托力冲击梁底, 不得不抬高码头面, 从而相应抬高后方场地地面高程, 增加整个码头工程的土方量。同时因为码头上部结构底面与水面之间净空很小, 维修非常困难, 往往需要停产维修; ④由于上部结构整体刚度差, 为承受各类水平力, 需设置斜桩, 增加了打桩难度; 后方棱体下沉时桩帽易裂, 不能适应地震荷载, 且桩帽底面标高较低, 施工时钢筋接触海水, 直接影响了高桩码头的使用寿命; ⑤护舷设置需预制钢筋混凝土靠船构件, 该构件重量大, 与上部结构连接的现浇节点是薄弱环节, 极易在码头施工和使用时出现裂缝; ⑥桩帽混凝土需赶潮施工, 水上施工工作量大, 影响工程进度; ⑦现浇接头工作量大, 且需分多次施工, 因而整个码头工程的施工速度较慢。

随着我国国民经济的迅速发展, 高桩码头的应用越来越广, 如何解决高桩码头上部结构耐久性差的问题是目前我国水运行业面临的主要问题之一。

1 技 术 方 案

在吸取我国一些高桩码头设计施工成熟经验的基础上^[1,2], 提出一种能够显著提高高桩码头耐久性, 且

收稿日期: 2009-06-26

作者简介: 邴 晓(1969-), 男, 山东栖霞人, 高级工程师, 硕士, 主要从事港口与航道工程设计与研究。

E-mail: bingxiao@vip.163.com

施工简单快捷的新型高桩码头结构体系,同时力求使本结构体系的工程造价与现行常规的梁板式高桩码头结构的工程造价相差不大.为此,提出了以下几个设计理念:①上部结构底边界为一平面,消除积存高盐分盐雾空气的危害;②结构内应力按无拉应力设计,避免施工和使用期由于受力产生裂缝;③全部上部结构外表面无内部钢筋露头,避免从结构外部锈蚀钢筋;④一个标准段上部结构为一整体,提高整体刚度,把水平力分布在一个标准段桩基的全部支承桩上,大大减小作用在每个桩顶上的水平力;⑤取消斜桩,采用全直桩基础;⑥独立的靠船系统.

1.1 结构设计方案

码头上部结构采用双向预应力整体箱板结构,桩基采用全直桩基础.上部结构沿码头纵向分段拼装,参考中交四航局和有关研究院的经验,按短线匹配法^[3,4]箱梁预制施工技术进行设计,在纵向分段预制时形成横向无粘结预应力构件^[5,6],预制的纵向分段在桩基上安装完毕后,在预留的孔洞及管道中进行预应力张拉,形成纵向有粘结预应力.预制箱板间采用胶接缝,进行单面涂刷防腐涂料.施工过程中,逐块安装箱板,每块箱板安装就位后,在箱板肋板中部预留的临时孔洞内,用预应力短筋施加预定的压力,保证2块箱板接缝间的胶合剂有效固化.在整体箱板与桩基连接处,采用三向预应力纤维混凝土.施工完成后,一个标准段码头的上部结构形成一个整体箱板.

本方案的优点是:①码头上部结构底面为一平面,不存在积聚盐雾潮湿空气的空间,并采用双向预应力和高性能混凝土,故结构整体刚度大、使用条件好、码头耐久性好、使用寿命长,并且水上工作量少,现浇混凝土量少,施工速度快;②由于一个码头段的上部结构为一整体箱板结构,整体刚度大,所有水平力可由一段码头下部的全部桩来共同承担,不需设置斜桩,减少了基桩的工程量和施工难度,而且上部结构高度小,在同等设计潮位条件下,可降低码头面标高,从而减少码头后方回填土方量;③由于整体箱板底面平整,离水面的净空大,便于使用期的检查和维修;④采用独立的护舷和桩基靠船系统,可避免悬臂靠船构件的弊病;⑤本结构体系的工程造价与现行常规的梁板式高桩码头结构的相差不大,由于整个工程量较常规的梁板式高桩码头结构小,如果采用合理先进的施工工艺、技术和方法,对于较大规模的工程,有可能使工程造价低于常规的梁板式高桩码头结构.

1.2 施工方法

本结构体系施工工序主要包括桩基施工、箱板预制、安装及箱板张拉等,工序简单,预制构件少,相互制约程度低.传统梁板结构体系施工工序主要包括桩基施工、水上现浇桩帽、梁板预制及安装等,工序多而复杂,预制构件多,水上现浇桩帽受外界条件影响大(钢筋接触海水,趁潮施工),预制构件的安装受到现浇桩帽混凝土强度的制约.因此,本结构体系相比于传统梁板结构体系,在施工工期上具有明显优势.

2 案例 1 分析比较

本案例为10万吨级集装箱泊位,码头顶面标高5.0 m,底面标高-16.0 m.码头极端高水位3.50 m,设计高水位2.26 m,设计低水位0.22 m,极端低水位-0.68 m.码头荷载条件为:①堆货荷载 $q=30\text{ kN/m}^2$;②集装箱装卸桥,轨距30 m,支腿间距15~16 m,每个支腿下10只轮,轮距0.9 m,作业期最大轮压800 kN,非作业期最大轮压1260 kN,垂直轨道方向水平力为110 kN/轮,平行轨道方向水平力为2500 kN/轮.

一个码头标准段长60.84 m,宽36.5 m,本方案上部整体箱板结构采用沿码头纵向分段拼装方案,按短线匹配法箱梁预制施工技术进行设计,由9块预应力箱板组成,每块板长36.5 m,宽6.76 m,高1.65 m,单块板重590 t.码头横向排架间距6.76 m,纵向排架间距10 m.前后两排桩间距3.38 m,中间两排桩间距6.76 m,钢管桩桩径均为1.2 m,壁厚18 mm.

案例1的码头结构(一个标准段)平面图和剖面图见图1.钢管桩上部涂刷防腐涂料(防腐材料要求保护30年),钢管桩内浇注C45高性能混凝土,钢管桩被腐蚀后,由桩芯钢筋混凝土作为码头的支撑体系.

与本案例对比的码头结构方案见图2,这是一个经过改进的传统梁板系统上部结构高桩码头,取消了桩

帽. 两种设计方案的工程量比较见表 1.

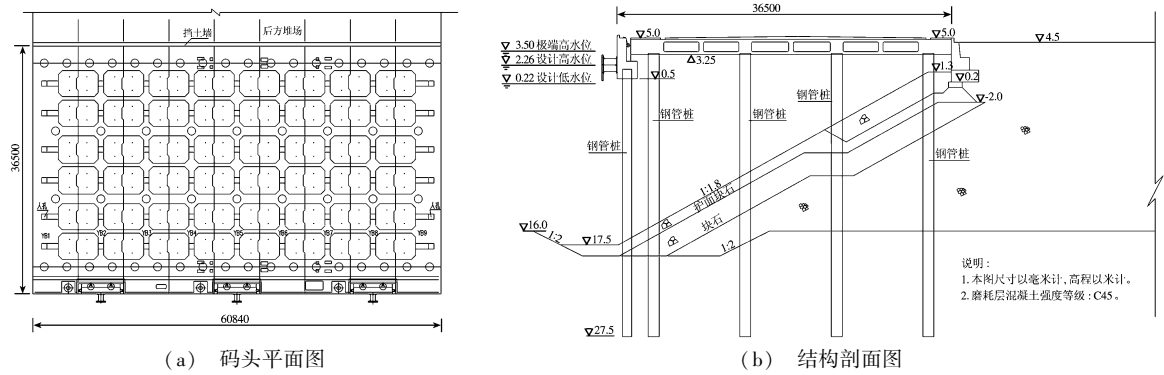


图 1 案例 1: 码头标准段的结构平面和剖面
Fig. 1 A normal segment of the wharf for case 1

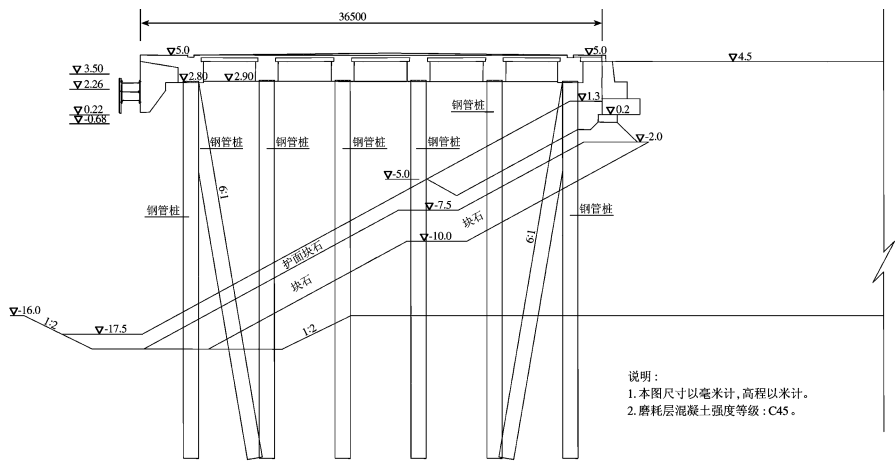


图 2 与案例 1 对比的传统高桩梁板式码头结构剖面
Fig. 2 Cross section of the structure of the customary high-piled beam-slab wharf compared with the structure for case 1

表 1 案例 1: 码头主要工程量比较 (码头标准段长 60.84 m)

Tab. 1 Comparisons of main quantities of the wharf for case 1 (length of the normal segment; 60.84 m)

项目名称	基 础				上 部 结 构					
	钢管桩用 钢量/ t	钢管桩 根数/根	桩芯内混凝土 用量/ m ³	桩芯内钢筋 用量/ t	混凝土 / m ³	预制板数 / 块	现浇混凝土 / m ³	钢筋 / t	预应力筋 / t	混凝土 表面防腐/m ²
箱板式 高桩码头	993.4	60	1 753	613	2 120	9	553	292	123	2 440
梁板式 高桩码头	1 136.4	78	2 117.5	847	381.5	54	2 419.5	377	0	3 800

如果将本方案箱板底标高从 3.25 m 降低到 2.9 m, 则所有桩的桩长均可减短 35 cm, 则桩基础的工程量将进一步减小.

3 案例 2 分析比较

本案例为 7 万 t 级通用泊位^[7], 水工结构按 10 万 t 级集装箱船预留, 码头顶面标高 4.5 m, 底面标高 -14.9 m. 设计水位、工程地质等基础资料与对比结构方案的相同. 码头极端高水位 3.33 m, 设计高水位 2.33 m, 设计低水位 0.23 m, 极端低水位 -1.27 m.

码头荷载条件为: ①堆货荷载 $q=30 \text{ kN/m}^2$ (码头前沿至门机陆侧轨之间), $q=80 \text{ kN/m}^2$ (门机陆侧轨至堆场边缘之间), 集装箱角荷载: 装卸桥两轨之间堆放 3 层 40 ft 重箱, 每个箱角荷载 145 kN, 接地面积 $178 \text{ mm} \times 162 \text{ mm}$; ②集装箱装卸桥, 作业期最大轮压 600 kN, 非工作期垂直轨道方向水平力为 100 kN/轮, 平行轨道方向水平力为 60 kN/轮; ③M16t-33m、M40t-35m 门机, 最大轮压 350 kN; ④50 t 汽车起重机空载运行, 打支腿作业, 单个支腿最大压力 460 kN; ⑤Q35 牵引车、50 t 平板车重载运行、5 t 叉车重载运行、20 t 载重汽车重载运行、单斗装载机重载运行, 最大轮压 0.65 MPa; ⑥40 ft 集装箱牵引车和半挂车, 计算最大轴压 165 kN, 双轮接地面积 $520 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$.

船舶荷载: ①系缆力, 经计算选用 1 500 kN 和 2 000 kN 系船柱; ②挤靠力, 计算得 $F'_j=295 \text{ kN}$; ③船舶靠岸时的撞击力, 船舶靠岸时的有效撞击能量 $E_0=302.5 \text{ kJ}$, 采用桩式靠船构件, 构件两侧分别设一鼓一板 SUC1000H 高反力型橡胶护舷和 DA-A400H 橡胶护舷; ④波浪作用产生的船舶撞击力, 作用于每个护舷上的有效撞击能为 $E_w=75 \text{ kJ}$ (考虑压载情况).

码头上部结构采用双向预应力整体箱板结构, 桩基为钢管混凝土直桩基础, 一个码头标准段长 65.52 m, 宽 35 m. 上部结构采用沿码头纵向分段拼装方案, 按短线匹配法箱梁预制施工技术进行设计, 由 9 块预应力箱板组成, 每块板宽 7.28 m, 高 1.65 m. 码头横向排架间距 7.28 m, 纵向排架间距自靠海侧第一排起分别为 10.5, 8.7, 10.8 m. 前两排纵向排架下钢管桩桩径 1.2 m, 壁厚 16 mm, 间距 7.28 m; 后两排纵向排架下钢管桩桩径 1.0 m, 壁厚 16 mm, 间距 3.64 m.

案例 2 码头结构一个标准段的平面图和结构断面图见图 3.

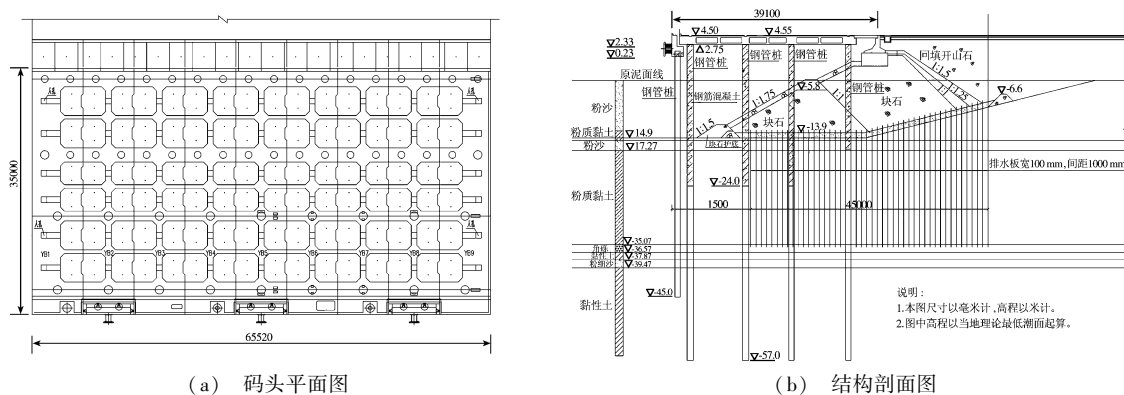


图 3 案例 2: 码头标准段的结构平面和剖面

Fig. 3 A normal segment of the wharf for case 2

3.1 结构计算

码头承台计算内容^[8,9]包括双向预应力箱板内力及配筋计算、桩的承载力计算、桩芯钢筋混凝土的承载力计算、码头变位计算. 码头接岸结构计算包括堤顶挡土墙的稳定验算、护面块体稳定重量及护面层厚度以及地基的整体稳定性验算.

3.1.1 码头承台 采用 ANSYS 对码头承台结构进行三维有限元计算. 码头承台由上部双向预应力箱板和桩基两部分组成, 上部双向预应力箱板按三维块体元计算, 下部桩基按梁单元计算. 箱板与桩之间按铰接

考虑. 桩基与土之间的关系主要参考 m 法, 确定出桩的嵌固点深度, 嵌固点处桩的约束为固端约束.

施工期单块预应力箱板吊装、安放时的内力计算结果如下: 吊装期跨中弯矩 $M_{\max}=754\text{ kN}\cdot\text{m}$, 支座弯矩 $M_{\max}=-1\,031\text{ kN}\cdot\text{m}$, 剪力 $Q_{\max}=781\text{ kN}$; 安放期跨中弯矩 $M_{\max}=19\,640\text{ kN}\cdot\text{m}$, 剪力 $Q_{\max}=2\,326\text{ kN}$. 整体箱板纵向张拉预应力筋时, 上下层面板及横向肋梁内次内力较小, 可忽略不计. 纵向肋梁内将产生较大次内力, 计算得岸桥下纵向肋梁(桩上)陆侧轨、海侧轨的跨中弯矩为 556 和 580 $\text{kN}\cdot\text{m}$, 纵向肋梁的门机下、中间桩及桩间的跨中弯矩为 312, 580 和 114 $\text{kN}\cdot\text{m}$

使用期双向预应力箱板内力计算结果见表 2.

表 2 使用期双向预应力箱板内力计算结果

Tab. 2 Results of internal forces of bidirectional prestressed concrete box-slab in use

构 件		弯矩 $M_{\max}/(\text{kN}\cdot\text{m})$				剪力 / kN
		跨 中		支 座		
		M_U	M_L	M_U	M_L	
上层面板	纵向	49.9	29.7	-42	-24.7	52.6
	横向	105	62.3	-50.4	-28.9	99.1
下层面板	纵向	9	6.2	-3.4	-1.9	7.3
	横向	15	10.7	47.9	27.2	27
岸桥下纵向肋梁(桩上 陆侧轨)		2 390	1 460	-1 300	-714	1 765.3
岸桥下纵向肋梁(桩上 海侧轨)		3 340	2 480	-1 170	-668	3 655
门机下纵向肋梁(桩上 中间轨)		1 670	896	-667	-503	2 564.8
中纵向肋梁(桩上)		1 970	1 320	-1 920	-1 400	467.9
桩间纵向肋梁(0.5m 宽 陆侧)		656	391	-211	-143	137.6
桩间纵向肋梁(0.5m 宽 海侧)		272	170	-139	-103	65
边横向肋梁		7 260	4 510	-3 860	-2 330	3 295
中横向肋梁		2 190	1 340	-982	-632	1 345

注: (1) M_U 为承载力极限状态的持久组合弯矩设计值; M_L 为正常使用极限状态的短期效应组合弯矩设计值. (2) 码头接岸结构计算. 地基整体稳定性验算采用圆弧滑动面计算. (3) 双向预应力箱板配筋计算. 根据有限元计算所得剪力和弯矩, 两个方向分别按无粘结和有粘结预应力结构进行配筋计算.)

3.1.2 桩的承载力计算 桩的承载力按码头在整个使用期间的 2 个阶段进行计算, 第一阶段是指钢管桩尚未腐蚀时, 钢管桩与桩芯钢筋混凝土共同工作的状态; 第二阶段是钢管桩被腐蚀后, 仅由桩芯钢筋混凝土单独工作的状态, 计算结果见表 3.

表 3 桩的承载力计算结果

Tab. 3 Results of bearing capacity of piles

阶 段	项 目	钢管桩直径	$\Phi 1\,000\text{ mm}$	$\Phi 1\,200\text{ mm}$	备 注
		闭塞效应系数	0.75	0.7	
		垂直极限承载力设计值	4 600 kN	7 100 kN	
钢管 混凝土	计算桩身轴力(kN)		4 072(边肋梁处) 5 890(中肋梁处)	8 350	持久组合
	计算桩底弯矩(M_U)($\text{kN}\cdot\text{m}$)		2 388	4 333	偶然组合
	计算桩底弯矩(M_L)($\text{kN}\cdot\text{m}$)		304	728	持久、准永久组合
	计算桩顶弯矩(M_U)($\text{kN}\cdot\text{m}$)		2 301	4 110	偶然组合
	计算桩顶弯矩(M_L)($\text{kN}\cdot\text{m}$)		378	918	持久、频遇组合
	计算桩底弯矩(M_U)($\text{kN}\cdot\text{m}$)		2 285	4 458	偶然组合
	计算桩底弯矩(M_L)($\text{kN}\cdot\text{m}$)		303	719	持久准永久组合
	计算桩顶弯矩(M_U)($\text{kN}\cdot\text{m}$)		2 350	4 213	偶然组合
桩芯 混凝土	计算桩顶弯矩(M_U)($\text{kN}\cdot\text{m}$)		380	915	持久、频遇组合
	计算桩顶弯矩(M_L)($\text{kN}\cdot\text{m}$)				

3.2.4 工程造价比较 根据交通运输部有关投资概算的编制规定,按同样的标准进行一个码头标准段的造价估算,然后折合到每延米的单位造价。由于比较的工程是在 2006 年设计的,因此每延米单位造价的绝对值

已没有参考价值,本文只对其相对造价进行比较.如传统梁板式码头每延米的相对单位造价为100%,则整体箱板式码头为99%.可见,如仅就结构本身而言,两者的造价几乎相同.但有两点应指出,一是本案例推荐的新型结构,虽然工程量有较大减少,但施工过程中采用新工艺的费用,只摊派在一个试验段的65.52延米码头上,因此,没有体现工程量减少的优势;二是在进行本方案与传统梁板式高桩码头比较时,由于根据传统梁板式高桩码头上部结构梁底标高2.04 m和上部结构高度2.4 m确定了码头面顶标高,故在本方案的设计中,虽然码头上部结构的高度只需1.7 m,为了保持相同的码头面顶标高,整体箱板结构底标高定为2.75 m,如果是另建一新码头,码头面标高至少可降低0.5 m,所有桩长都可减少0.5 m,加之整个码头结构后方场地回填可减少0.5 m,其经济效益将是十分可观的.

4 结 语

本文详细分析了传统梁板式高桩码头的主要缺点,针对这些缺点提出了几个新的设计理念,在借鉴道路桥梁建设成熟经验的基础上,结合码头使用的特点,提出了一种新型码头结构——整体箱板式高桩码头结构,从设计和施工技术方面进行了全面的研究,并通过2个设计案例说明了其在功能、施工、经济上的优越性.这种新型码头结构,应用新的设计理念,集成了我国近四十年来在港工和桥梁建设中的技术发展成果,如多向预应力钢筋混凝土设计施工技术、高强度绞线在港工中的使用经验、各种类型桩的设计与施工技术、大重量预制构件安装技术和高性能混凝土使用等多种先进技术,使高桩码头结构的使用寿命得到可靠保证,较好地解决了长期以来困扰工程界的高桩码头的耐久性问题,而从造价上来说,同传统的梁板结构高桩码头相比相差不大.从码头结构整体寿命评估的意义上来说,这是非常合理的.

参 考 文 献:

- [1] 中港四航局第二工程公司. 大型嵌岩钢管桩码头成套施工技术研究情况综述[R]. 广州:中港四航局第二工程公司, 2004. (The Second Engineering Company of CCCC Forth Harbor Engineering Co., Ltd.. Summary of construction technology of the steel tubular piles driven in decomposed rocks wharf[R]. Guangzhou: The Second Engineering Company of CCCC Forth Harbor Engineering Co., Ltd., 2004. (in Chinese))
- [2] 广州四航工程技术研究院. 大型嵌岩钢管桩码头成套施工技术研究报告——海工高性能混凝土综合技术研究[R]. 广州:广州四航工程技术研究院, 2004. (Guangzhou Sihang Institute of Engineering Technology. Research report of construction technology of the steel tubular piles driven in decomposed rocks wharf-comprehensive technology research of marine engineering high-performance concrete[R]. Guangzhou: Guangzhou Sihang Institute of Engineering Technology, 2004. (in Chinese))
- [3] 中港四航局第一工程公司. 短线匹配法箱梁预制施工技术研究报告[R]. 广州:中港四航局第一工程公司, 2004. (The First Engineering Company of CCCC Forth Harbor Engineering Co., Ltd.. Research report of construction technology of box beam segment prefabricated by short-line matching method[R]. Guangzhou: The First Engineering Company of CCCC Forth Harbor Engineering Co., Ltd., 2004. (in Chinese))
- [4] 中港四航局第一工程公司. 短线匹配法箱梁预制施工技术工作总结[R]. 广州:中港四航局第一工程公司, 2004. (The First Engineering Company of CCCC Forth Harbor Engineering Co., Ltd. Summary of construction technology of box beam segment prefabricated by short-line matching method[R]. Guangzhou: The First Engineering Company of CCCC Forth Harbor Engineering Co., Ltd., 2004. (in Chinese))
- [5] JGJ/T92-93, 无粘结预应力混凝土结构技术规程[S]. (JGJ/T92-93, Specifications for Unbonded Pre-stressed Concrete Structure[S]. (in Chinese))
- [6] 陶学康. 无粘结预应力混凝土设计与施工[M]. 北京:地震出版社, 1993. (TAO Xue-kang. Design and construction of unbonded pre-stressed concrete[M]. Beijing: Seismological Press, 1993. (in Chinese))
- [7] 中交水运规划设计院. 大连某公共港区#1~#3通用泊位工程初步设计[R]. 北京:中交水运规划设计院, 2006.

- (CCCC Harbor Engineering Consultants Co., Ltd.. Preliminary plan of the NO.1 ~ NO.3 general bulk cargo berth of one port in Dalian[R]. Beijing: CCCC Harbor Engineering Consultants Co., Ltd., 2006. (in Chinese))
- [8] JTJ291-98, 高桩码头设计与施工规范[S]. (JTJ291-98, The Design and Construction Specification for High-piled Wharf [S]. (in Chinese))
- [9] JTJ267-98, 港口工程混凝土结构设计规范[S]. (JTJ267-98, The Design Specification for Concrete Structure in Port Engineering[S]. (in Chinese))

An innovative scheme of new type wharf structure

(The design and construction technique of a piled wharf with monolithic box-slab superstructure)

BING Xiao¹, QIU Da-hong^{1,2}, TONG Cheng-cai¹, SU Ping¹

(1. Design Institute of Civil Engineering and Architecture Co., Ltd., Dalian University of Technology, Dalian 116024, China; 2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The study presents a number of main problems on the durability and monolithic character waiting to be solved in customary high-piled beam-slab wharf scheme. Aiming at these problems, the authors propose some new design concepts, and suggest an innovative scheme of new type wharf superstructure. The main points of the new scheme are as follows. Dual directional prestressed concrete box-slab is used as the superstructure and all vertical piles are used for the pile foundation of the wharf. The superstructure divides in several segments along the longitudinal direction of the wharf while precast and put together as a whole in site. The box-slab segments are designed by the method using matching precasting technique. Bondless prestressed technique is used in precasting the longitudinal segment. After all these segments of a whole wharf section are put together in site, steel wires will pass through the remaining holes in the segment during precasting. After stretching the steel wires to the designed stress and bonded them tightly, these holes will be full with cement mortar and thus the wharf section will be prestressed along the longitudinal direction in whole. Between the segments, special adhesive agent is used to bond them together, and enough pressure is given to ensure full solidification of the adhesive agent by stretching short steel bars, which are prepared beforehand. At the connecting joints of the box-slab and pile foundation, three directional prestressed fiber concrete can be used. Thus, after construction, the superstructure of a wharf section will be integrated as a whole. Two construction cases of the wharf structure are introduced. Through the analysis and comparison between them, it clearly illustrates the superiority and promising applications of the new scheme in the aspect of design, construction, work amount, and economic indicator, etc.

Key words: monolithic type box-slab high-piled wharf; durability of superstructure; design concept