



特殊条件下超等级船舶系泊设计与实践

张翠莹，陈磊，王君辉

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司，湖北 武汉 430060)

摘要：巴基斯坦某项目受工期和自然条件影响，卸船机整机上岸必须在码头尚未完工的特定窗口期进行，且卸船机远输船舶等级远超码头设计船型，需布置临时系泊设施。针对码头系泊设施，开展了一系列比选和研究工作，用数值模拟软件分析船舶在风、浪、流综合作用下的系缆力情况，提出一种可快速组装和拆除的重力式临时系锚结构并付诸实施。工程实践表明，该系统具有可靠性高、经济性好、施工方便的优点。

关键词：整机上岸；超等级船舶；临时系锚结构；系缆力计算

中图分类号：U 656.1

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2023)01-0057-07

Design and practice of super-class ship mooring facilities under special conditions

ZHANG Cui-ying, CHEN Lei, WANG Jun-hui

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430060, China)

Abstract: Because a certain project in Pakistan is affected by the construction period and natural conditions, the whole unit unloading must be carried out in the specific window period when the wharf has not been completed, and the ship type used for transporting the ship unloader is far beyond the designed ship type of the wharf, so temporary mooring facilities need to be arranged. In this paper, a series of comparison and research work are carried out to analyze the mooring force of ships under the combined action of wind, wave and current by numerical simulation software, and a temporary gravity mooring scheme which can be quickly assembled and dismantled is proposed and put into practice. The engineering practice shows that the system has the advantages of high reliability, good economy and convenient construction.

Keywords: whole unit unloading; super-class ship; temporary mooring structure; calculation of mooring load

巴基斯坦某1万吨级煤炭进口码头项目所在地区自然条件恶劣，波高大、波周期长，该项目4台1 000 t/h桥式抓斗卸船机采用一次运输到港、整机上岸的安装方式，卸船机运输采用的5万吨级半潜驳靠泊卸船时，码头主体工程尚未全部完工，码头的系缆及靠泊设施尚未完善。为确保运输船舶的系泊安全，需在码头尚未全部完工且靠

泊船舶远超设计船型的前提下，布置船舶系缆设施并分析船舶系缆荷载。本文通过船舶与波浪间的静态、动态响应2种方法对比计算各系泊点系缆力，准确地反映波浪作用下各系缆点的状态，同时利用钢托盘加Core-LockTM块体压载的临时系锚结构解决了超等级船舶靠泊码头结构的系缆问题，为实现设备运输船舶安全、稳定系泊提供了保障。

1 工程概况

1.1 总平面布置

本项目设计卸煤作业泊位 2 个，泊位总长

265 m、宽 24 m，引桥及引堤总长 995 m，码头采用岛式防波堤掩护，防波堤总长 727 m，见图 1。

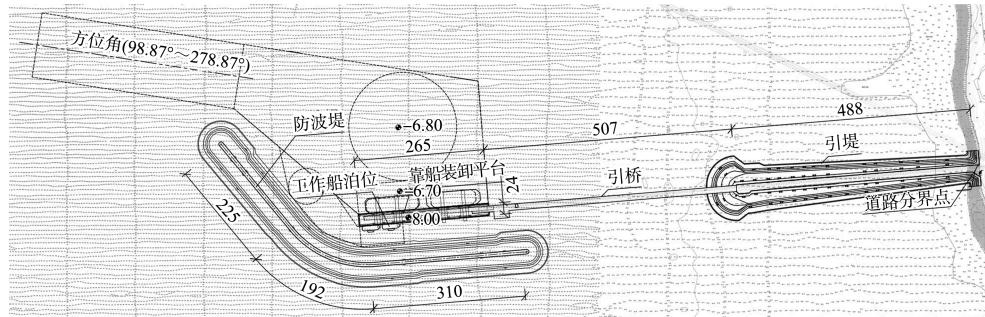


图 1 码头总平面布置 (单位: m)

1.2 码头结构及系靠泊设施布置

1.2.1 码头结构

码头平台采用高桩梁板结构，排架间距 8 m，分为 2 个结构段，每个结构段布置排架 17 榼，每

榼排架下布置 4 根 $\phi 1350$ mm 钻孔灌注桩。上部结构由钢筋混凝土迭合板、现浇前边梁、预安轨道梁、预安纵梁、预安后边梁和现浇横梁等组成，见图 2。

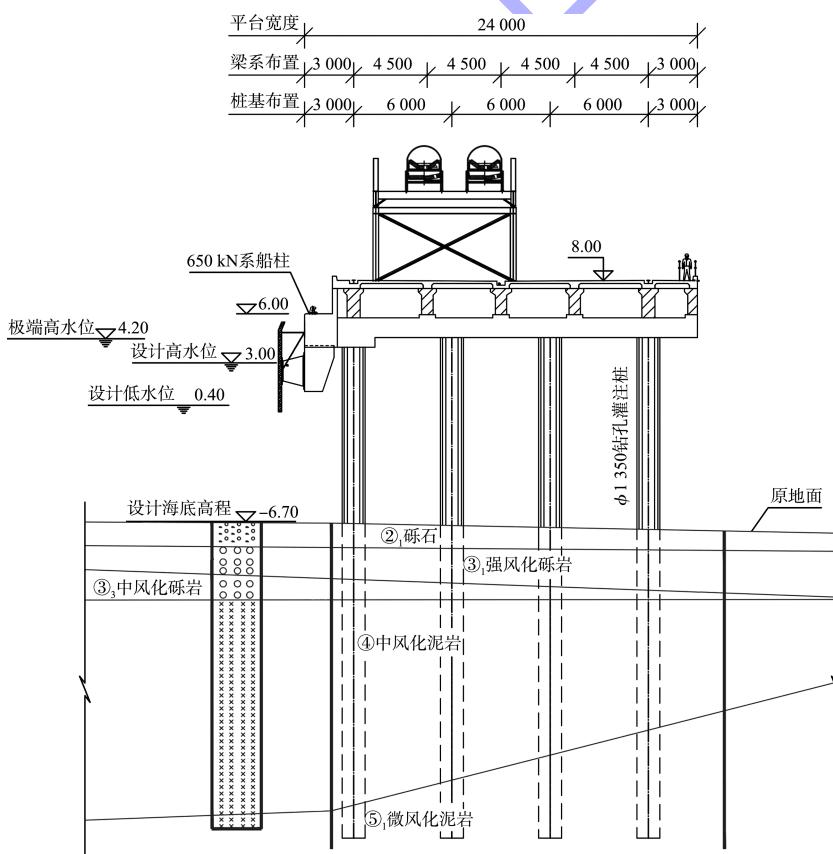


图 2 码头结构典型剖面 (高程: m; 尺寸: mm)

1.2.2 系靠泊设施布置

码头设计船型为 1 万 t 驳船，型长 100.0 m，

型宽 30.0 m，型深 7.2 m，满载吃水 5.6 m，干舷高度 1.6 m，码头系缆选用 650 kN 系船柱，间距

为 16.0 m, 码头防撞护舷采用 SPC 1400H F3.4 锥形橡胶护舷。

1.3 超等级船舶靠泊时码头现状

1.3.1 超等级船舶选型

码头总工期 27 个月, 根据项目进度计划安排, 码头 1 000 t/h 桥式抓斗卸船机需采用整机运输到场、整机上岸形式进行安装, 整机上岸后需预留 6 个月的土建及配套工程安装及调试工期。该项目位于阿拉伯海域, 每年 5—10 月为季风期, 项目竣工时间为当年 12 月底, 因此卸船机必须在季风期来临前完成上岸作业, 否则整个项目进度将滞后半年左右。考虑到卸船机制造进度、现场实施条件、自然条件、船运经济性等因素, 最终选用 4 台卸船机设备一次运输的方案, 运输船采用 5 万吨级半潜驳, 船型尺寸为总长 (LOA) 225.0 m、型宽 32.2 m、型深 13.5 m、设计吃水 8.5 m。运输船舶的吨位等级和尺度均远大于设计船型, 为保证船舶安全进港靠泊, 船舶将在进港靠泊前减载, 从而满足设计水深的需求, 但靠泊后的系靠泊设施仍需进一步论证。

1.3.2 自然条件分析

1) 风。根据工程附近气象站 1996—2015 年的实测资料^[1], 工程区域最大风速为 32.59 m/s, 方向为 SW 向; 强风向主要是 SW 和 W 向, 常风向为 WSW 向, 风玫瑰见图 3。

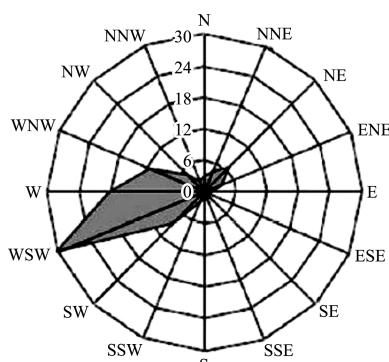


图 3 风玫瑰

2) 流。根据数学模型报告成果, 工程区域涨潮流主要为 ENE—E 向, 落潮流主要为 W—NW 向, 近岸大潮最大流速为 0.27~0.38 m/s, 小潮最

大流速为 0.20~0.29 m/s。

3) 浪。工程所在区域 5—10 月为季风期, 通常始于 5 月中旬, 根据 2015 年实测波高数据显示, 5 月的波高逐渐变大, 呈缓慢向上趋势, 越往后海况越恶劣, 符合整年的波浪变化趋势, 见图 4。从谱峰周期来看, 从 5 月开始, 日均值也渐趋较大值, 不利于卸船, 见图 5。

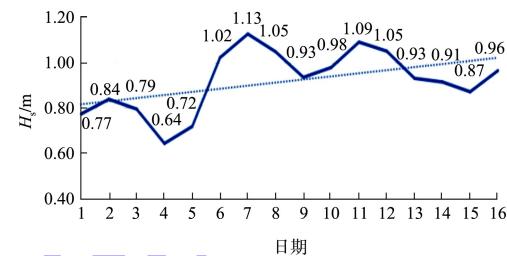


图 4 2015 年 5 月日均波高变化曲线

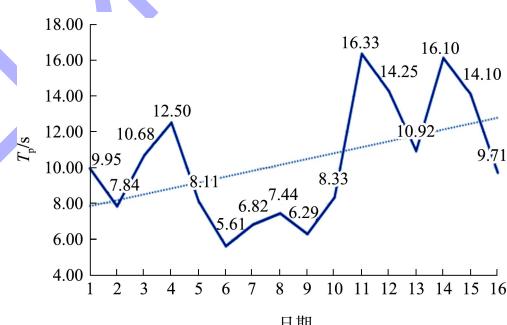


图 5 2015 年 5 月日均谱峰周期变化曲线

1.3.3 卸船机卸船条件

超等级船舶靠泊及卸船机整机上岸过程中对现场自然条件要求较高, 为确保船舶靠泊系缆安全, 要求风速不大于 6 级, 即风速不大于 13.8 m/s^[2]; 最大流速不大于 0.40 m/s; 现场作业波高不大于 0.5 m。

1.3.4 码头条件

根据施工进度安排, 在 5 月中旬卸船机运输靠泊时码头 1#泊位施工完成 100%, 2#泊位施工仅完成 40%, 此时形成的码头结构长度为 132.5 m。卸船机运输船总长 225 m, 现场具备的泊位长度达到总长的 0.59, 参考 LNC 船靠泊尺度要求^[3], 已完成泊位可满足船舶靠泊条件, 但不具备带缆条件, 超等级船舶靠泊见图 6。

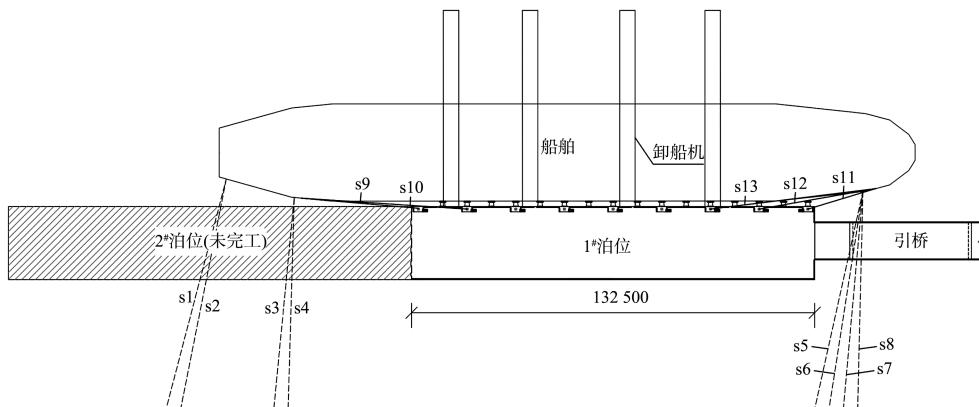


图 6 超等级船舶靠泊

2 系靠泊设施复核

2.1 靠泊设施复核

船舶撞击能计算采用 BS 6349-4: 2014: *Design of fendering and mooring systems* 中的公式:

$$E_c = 0.5 C_m M_d v_b^2 2 C_e C_s C_c \quad (1)$$

式中: E_c 为护舷吸收的船舶正常撞击靠泊能量 ($\text{kN}\cdot\text{m}$); C_m 为附加质量系数; M_d 为船舶满载排水量质量 (t); v_b 为船舶靠岸法向速度 (m/s);

C_e 为靠泊偏心系数; C_s 为软度系数; C_c 为泊位配置系数, 通常取 1.0。

5 万吨级半潜驳减载后的排水量近似按照 3 万吨级散货船的满载排水量考虑, 靠泊角度为 10° , 海水密度为 1.025 t/m^3 , 原泥面线为 -6.7 m , 经多拖轮辅助后按靠泊速度 0.15 m/s 对码头护舷进行复核, 与码头设计船型 1 万 t 驳船的船舶撞击能进行对比, 结果见表 1。

表 1 船舶靠泊撞击能计算结果

船型	靠泊排水量/t	船长/m	船宽/m	吃水/m	靠泊速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	水位/m	设计撞击能/($\text{kN}\cdot\text{m}$)
1 万 t 驳船	15 700	110	30.0	5.6	0.30	3.0	1 081.16
	15 700	110	30.0	5.6	0.30	0.4	1 206.66
3 万 t 船舶	41 600	217	32.2	6.5	0.15	3.0	661.01
	41 600	217	32.2	6.5	0.15	0.4	739.83

本项目护舷连续布置, 间距 8.0 m, 根据上述计算结果, 码头原设计护舷布置及护舷型号满足 5 万吨级半潜驳靠泊要求。

2.2 系缆设施复核

2.2.1 系缆布置

5 万 t 半潜驳靠泊码头后, 根据泊位要求, 共需布置 5 个出缆点、13 根缆绳。其中 $s_9 \sim s_{13}$ 为倒缆, $s_1 \sim s_8$ 为横缆。根据码头施工完成情况可知, 倒缆 $s_9 \sim s_{13}$ 可利用已完成的码头结构平台, 横缆 $s_1 \sim s_8$ 无可依托的结构设施, 需另外考虑, 见图 6。

2.2.2 系缆力计算

2.2.2.1 计算方法选择

常规项目系缆力一般采用规范中相关公式进

行计算, 但规范仅就作用于船舶上的风荷载和水流力提出了计算方法, 在系缆力分解中仅简单地进行了代数分解。船舶实际系缆过程中, 影响其安全系泊的自然因素除风、流外, 波浪也是重要影响因素之一, 并且波浪对船舶系缆力的影响十分复杂, 不仅包括波浪作用的方向、波高、周期及码头系缆设施的布置方式等外在因素, 同时也涉及船舶自身尺度、装载状态、带缆根数及缆绳材质、破断力等内在因素。常见国内外技术规范关于波浪对船舶系缆力的影响均未提及。本项目所在区域波浪周期较长、船舶系缆情况复杂、船舶泊稳要求高, 采用专业的软件计算可考虑波浪对系缆力的影响, 是比较方便、有效的方法。

发的 optimoor 软件考虑波浪作用进行船舶荷载的计算, 是比较常用的方法。考虑到系缆力计算结果的重要性, 除采用 Optimoor 软件进行计算外, 同时也采用了一款专业的海洋作业模拟软件对船舶系缆力进行对比计算。

2.2.2.2 Optimoor 软件计算结果

根据上述自然条件分析, 船舶靠泊时的环境条件为: 有效波高 H_s 为 0.5 m, 谱峰周期 T_p 为 11 s,

计算风速 v_w 为 13.8 m/s, 表层流速 v_c 为 0.4 m/s。

根据数模分析结果, 防波堤建成后码头区域流向基本为顺流, 故流向近似按照纵向往复流 0°和 180°两种情况考虑; 风向取 3 种方向, 分别为 30°、45°、60°; 浪向取 3 种方向, 分别为 30°、45°、60°。共有 18 种计算工况, 见表 2。根据计算结果, 最不利工况为浪向 60°, 具体结果见表 3。

表 2 风浪流组合工况

工况	流向/(°)	风向/(°)	浪向/(°)	工况	流向/(°)	风向/(°)	浪向/(°)
1	0	30	30	10	180	30	30
2	0	30	45	11	180	30	45
3	0	30	60	12	180	30	60
4	0	45	30	13	180	45	30
5	0	45	45	14	180	45	45
6	0	45	60	15	180	45	60
7	0	60	30	16	180	60	30
8	0	60	45	17	180	60	45
9	0	60	60	18	180	60	60

表 3 Optimoor 软件计算结果

缆绳编号	拉伸长度/m	缆绳总长/m	线性运动/m	倾斜角度/(°)	缆绳张力/kN	强度百分比/%
s1	9.0	109.8	0.40	3	134	17
s2	8.9	108.3	0.40	3	135	18
s3	8.2	100.7	0.40	3	142	19
s4	8.3	101.6	0.40	3	141	18
s5	3.2	31.9	0.18	11	46	6
s6	4.6	46.1	0.12	7	36	5
s7	6.1	60.4	0.09	5	37	5
s8	7.6	74.8	0.07	4	39	5
s9	1.1	33.8	0.14	13	215	28
s10	7.6	101.1	0.40	3	134	17
s11	7.9	107.8	0.39	2	125	16
s12	8.2	104.9	0.40	2	129	17
s13	8.2	105.0	0.40	2	129	17

由计算结果可知, 对应横缆 s1~s8, 需单独设置的系统设施最大受力为 142 kN; 对应倒缆 s9~s13, 可利用码头上系船柱的最大受力为 215 kN, 原设计的码头系船柱可满足受力要求。

2.2.2.3 海洋作业模拟软件计算结果

OPTIMOOR 计算软件是基于准静态模式的模拟, 而实际波浪作用下系泊船舶的运动响应是一个时域范围内的动态响应过程, 故采用某海洋作业模拟软件, 按照动态响应法对 OPTIMOOR 的结果^[4]进行复核, 见表 4。

表 4 海洋作业模拟软件计算结果

缆绳编号	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13
缆绳张力/kN	333	337	323	321	197	199	207	208	284	220	574	428	369

由上述计算结果可知，对应 s1~s8 缆绳，需单独设置系缆设施的最大受力为 337 kN；对应 s9~s13 缆绳，系缆于码头上系船柱的最大受力为 574 kN。考虑船舶运动动态响应的计算结果较 OPTIMOOR 计算结果偏大，但二者计算的结论是一致的：即已有系船柱均可满足受力要求，横缆需额外设置系锚点。

3 系泊设施设计与实践

3.1 系泊设施设计

3.1.1 方案选择

根据系缆设施复核结论，本工程共需新增临时系锚点 8 个。常用的系锚点结构包括高桩墩台结构、混凝土地锚结构等。高桩墩台结构需要沉桩、浇筑上部结构混凝土、安装附属设施等施工工序，施工工期长、工程投资大。地锚结构则需在现有防波堤堤顶现浇大体积混凝土，施工后将占用防波堤堤顶、影响防波堤施工且运营期承受大浪作用下易发生蠕变，影响防波堤稳定。因此，

高桩墩台及混凝土地锚结构均不适用于本工程。

为解决船舶临时系泊的难题，在考虑施工可行、进度可控、费用较低的前提下，结合现浇混凝土地锚结构的受力特点，分析现场具备的各种条件，提出钢托盘临时系锚结构^[5]。该结构利用钢制托盘作为承托结构，托盘上放置防波堤护面块体 Core-Lock™ 作为压载，利用托盘与防波堤堤心间的摩擦力抵抗系缆力。

3.1.2 结构布置

钢托盘结构为装配式钢结构，采用型钢焊接而成。本项目防波堤采用 6.3、7.9 m³ 的 Core-Lock™ 块作为护面，选用其中的 7.9 m³ Core-Lock™ 块规则摆放在钢托盘结构顶面作为人工压载块体，与钢托盘结构形成整体，其自重产生的摩擦力提供船舶系缆抵抗力。根据 s1~s8 缆绳布置，共布置 3 个钢托盘。其中 s1、s2 共用钢托盘 1，s3、s4 共用钢托盘 2，s5~s8 共用钢托盘 3，钢托盘布置和船舶系缆剖面见图 7。

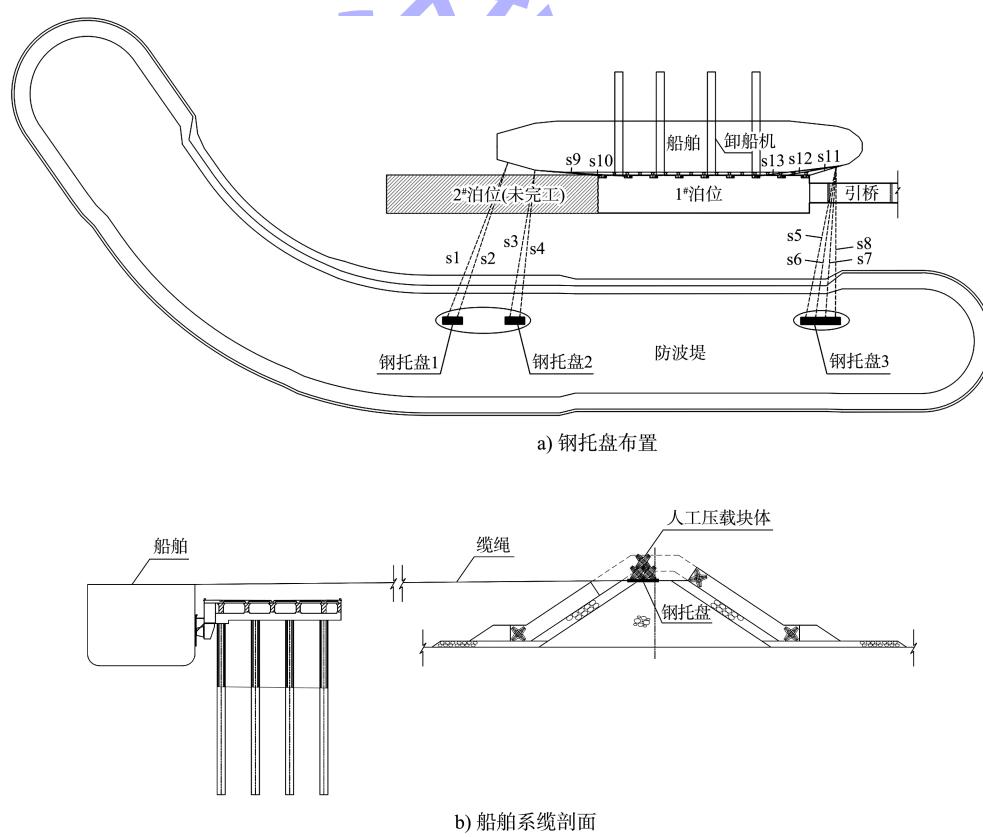


图 7 临时系锚布置

3.1.3 结构计算

钢托盘单个标准件平面尺寸为 $6.2\text{ m} \times 4.5\text{ m}$, 其中钢托盘1、2由2个标准件焊接而成, 钢托盘3由4个标准件焊接而成。以钢托盘1、2为例(图8), 单个标准件上摆放6块 7.9 m^3 的Core-Lock块, 自身质量为109.02 t。钢托盘与抛石堤心顶部的摩擦系数按照0.45考虑^[6], 单个标准件可提供的摩擦力为491 kN, 可满足最大缆绳拉力337 kN的系缆要求。同时, 利用三维模型对钢托盘拉环进行强度计算, 在承受系缆拉力的情况下, 拉环最大应力为103 MPa, 应力结果表明托盘强度满足设计要求, 见图9。

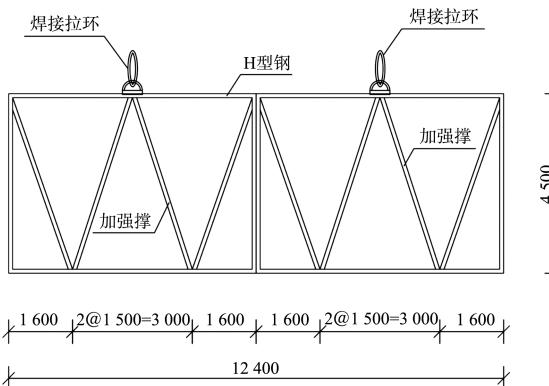


图8 钢托盘1、2结构 (单位: mm)

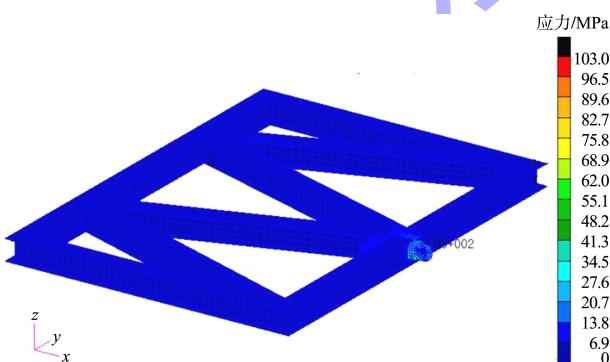


图9 拉环应力计算结果

3.2 实施效果

钢托盘临时系锚结构优点在于: 1)施工周期短。其施工周期主要为钢托盘焊接制作的时间, 现场反馈1周之内3个钢托盘全部制作完成。2)陆上施工方便, 不影响水上施工。钢托盘的焊

接在陆上进行, 制作完成后拖运到现场即可, 不影响水上防波堤施工。3)可循环利用, 拆除方便。利用现有防波堤护面块体作为人工压载块体, 使用完成后拆除方便, 人工压载块体可继续作为护面块体使用。临时系锚结构制作、使用、拆除的整个过程未改变现场任何既有结构设施, 现场实施效果见图10。

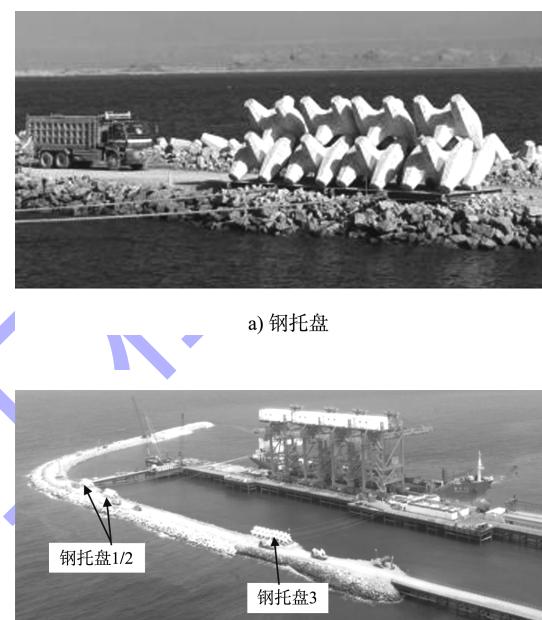


图10 现场实施效果

4 结论

1)按照规范计算系缆力未考虑波浪对船舶系缆的影响, 如波浪影响对船舶安全系泊较敏感时, 采用相关软件计算分析波浪作用下的系缆力是有效的方法。

2)卸船机整机上岸施工属于港口工程设备安装中的重点工作, 其受波浪、水流、风速、码头前沿水深、锚泊布置等诸多因素影响, 整机安装施工中需确保卸船机运输船舶的可靠停泊, 这是确保卸船机整机上岸的前提和保障。

3)利用钢制托盘加护面块体作为临时系锚结构, 在提供有效系锚点的同时, 还具有结构简单可靠、施工方便、可循环利用、造价低等诸多优点。

(下转第69页)