



海南炼化 100 万 t/a 乙烯项目 配套码头设计要点

王勇健, 张丽珍, 刘海欣, 宓宝勇, 林先炜, 李艺颖
(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 为总结和推广乙烯项目配套码头设计经验, 以海南炼化 100 万 t/a 乙烯项目配套码头设计为例, 提出该工程设计需解决的关键技术问题包括: 装卸货种多、船型种类多且跨度较大、建设期重大件运输保障、复杂地质条件下的水工结构设计、深厚抛石堤上工艺管架基础设计等问题。通过分析船型和地质条件, 优化装卸工艺和总平面布置以及创新结构设计, 有效解决了设计难点。

关键词: 乙烯项目; 配套码头; 设计要点

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0213-06

Key points of supporting terminal design for 1 million t/a ethylene project in Hainan Refining & Chemical

WANG Yongjian, ZHANG Lizhen, LIU Haixin, MI Baoyong, LIN Xianwei, LI Yiyang
(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: To summarize and promote the design experiences of supporting terminals for ethylene projects, taking the design of supporting terminals for 1 million t/a ethylene project in Hainan Refining&Chemical as an example, the key technical problems that need to be solved in this engineering design include: the problem of multiple types of loading and unloading cargo, multiple types of ship types and large spans, transportation guarantee for major items during construction, hydraulic structure design under complex geological conditions, and foundation design for process pipe racks on deep riprap embankment. By analyzing the ship type and geological conditions, optimizing the loading and unloading process and overall layout, and innovating structural design, the key problems are effectively solved.

Keywords: ethylene project; supporting terminal; key points of design

1 工程概况

海南炼化 100 万 t/a 乙烯项目配套码头位于海南洋浦港神头港区神北二港池北侧, 主要为海南炼化公司 100 万 t/a 乙烯项目新增的液化烃原料和化工品提供港口运输服务。共建设 4 个泊位, 1 个 5 万 GT LPG 泊位 (1[#] 泊位, 泊位长度满足 2 艘 5 000 GT LPG 船同时靠泊)、2 个 2 万吨级液体化学品泊位 (2[#]、3[#] 泊位, 泊位长度满足 3 个

1 万吨级液体化学品船同时靠泊)、1 个 3 万吨级件杂货泊位 (4[#] 泊位, 泊位长度满足 2 艘 5 000 吨级件杂货船同时靠泊, 兼顾 1 艘 2 万吨级危险品滚装船靠泊及建设期重件接卸功能), 港口岸线总长 1.215 9 km, 设计通过能力 560.2 万 t/a, 同时建设防波堤 1.935 8 km、引堤 700 m^[1]。工程总体布置见图 1^[2]。

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 王勇健 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程规划与设计工作。

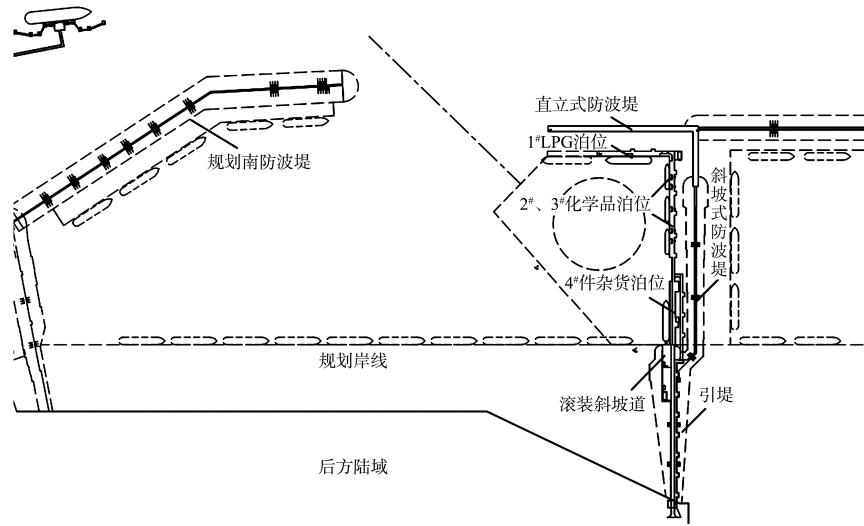


图1 工程总体布置

2 自然条件

2.1 水文气象条件

风：常风向为 NE 向，频率 11.5%；强风向为 NNE 向，最大风速 25.0 m/s。极端最大瞬时风速 38.5 m/s。

水位：工程海域潮汐性质属正规全日潮，设计高水位 3.64 m、设计低水位 0.69 m、极端高水位 5.27 m、极端低水位 -0.40 m。

潮流：码头前沿的水流条件较好，最大横流均不超过 0.05 m/s，进港航道横流较大，最大为 0.56 m/s。

波浪：在规划的南侧防波堤未建成之前，工程建设的北防波堤对常浪向 W—SW 向的波浪掩护较差，码头泊稳条件较差，码头前沿 2 a 一遇 $H_{4\%}$ 最大为 2.80 m (M_5 点)^[3]。码头前沿 2 a 一遇最大波要素见表 1。

表 1 码头前沿 2 a 一遇最大波要素

采样点	$H_{1\%}/m$	$H_{4\%}/m$	$H_{13\%}/m$	H_m/m	L_m/m	T_m/s	波向
M_1	2.10	1.77	1.42	0.89	66	6.6	WSW
M_2	1.97	1.66	1.33	0.83	66	6.6	WSW
M_3	2.41	2.04	1.64	1.03	66	6.6	WSW
M_4	2.70	2.28	1.83	1.16	66	6.6	WSW
M_5	3.30	2.80	2.26	1.44	63	6.5	W
M_6	3.21	2.73	2.22	1.41	62	6.6	WSW
M_7	3.01	2.56	2.08	1.33	61	6.6	WSW

2.2 地形地貌及泥沙运动

工程海域含沙量低，自然沉积速率小，水下

地形基本稳定。码头建成后，港内水流动力弱，不存在大冲大淤的可能性，泥沙回淤轻微，维护量小。

2.3 地质条件

根据地质勘察成果^[4]，工程区地质条件复杂，地层起伏变化大。防波堤区域的泥面高程 -18 ~ -11 m 表层为良好的持力层；泥面高程 -20 ~ -18 m 表层有约 10 m 软土，持力层埋藏较深。码头区域的工程地质起伏变化也很大，1#、2# 泊位原泥面高程约 -20 m，表层为深厚淤泥，厚度普遍大于 10 m，强度较低；3# 泊位东南侧至 4# 泊位区域浅表层普遍存在玄武岩或凝灰岩，但岩层分布、厚度不均匀，风化程度不同。

3 关键技术问题及解决方案

3.1 装卸货种多、船型种类多且跨度较大

码头为海南炼化乙烯厂区原材料和产成品提供装卸服务，在码头装卸的液体散货、滚装货种分别有 18、19 种，涉及低温液化烃、常温液化烃、易燃化学品、有毒化学品和强腐蚀化学品，另有 9 种件杂货，建设期还需承担后方厂区的重大件设备接卸任务。运营期设计船型包括液化烃船型、化学品船、滚装船和件杂货船，建设期兼顾重大件运输以及平板驳船。其中，液化烃船型范围为 1 000 ~ 5 万 GT，化学品船船型范围为 1 000 ~ 2 万 DWT，杂货船型范围为 1 000 ~ 3 万 DWT，滚装船型范围

为 1 000~2 万 DWT, 重大件运输(甲板驳)船型范围为 3 000~1.5 万 DWT。装卸货种和船型种类多, 且跨度较大。

设计主要从两方面考虑: 1) 总平面布置方面。液体散货泊位均采用连片式布置, 所有泊位采用上下双层系缆设计。1#LPG 泊位上下层系缆设施均采用快速脱缆钩, 上层采用 1 000 kN 快速脱缆钩, 下层采用 650 kN 快速脱缆钩(用于系泊 1 万 GT 及以下船型)。2#和 3#化学品泊位的上层设置 650 kN 快速脱缆钩(用于系泊 2 万 DWT 船型)及 650 kN 系船柱, 下层设置 650 kN 系船柱, 码头前沿设置系解缆通道, 由上下阶梯和排架间的走道板组成, 下横梁处开设人孔形成连续通道, 方便船舶系缆、解缆作业。4#件杂货泊位前沿设置系船梁作为上、下层系解缆平台, 系船梁与码头面通过阶梯连接。2) 装卸工艺方面。统筹安排液体散货泊位装卸点布置及数量, 性质相近的货种安排在同一装卸点作业; 运量较少的货种, 安排 1 或 2 个装卸点作业; 运量较多的货种, 安排多个装卸点作业。液体散货泊位共设置 8 个装卸点, 在 1#LPG 泊位设置 3 个装卸点, 在 2#、3#化学品泊位共设置 5 个装卸点, 在保证泊位通过能力的前提下, 有效减少了装卸工艺管道及设备的配置。液体散货泊位装卸点布置见图 2。

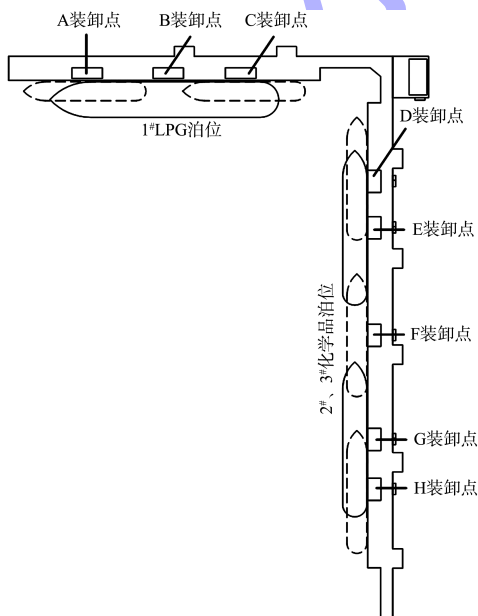


图 2 液体散货泊位装卸点布置

3.2 建设期重大件运输保障

码头除了为后方乙烯厂区原材料和产成品提供装卸服务外, 建设期 4#件杂货泊位还需承担后方厂区的重大件设备接卸任务。参考中科炼化^[5]、中委广东石化^[6]、惠州埃克森美孚^[7]和海南炼化等大型乙烯项目的重大件尺度和重大件运输道路参数, 大型乙烯项目最重件质量 1 400.0~3 800.0 t, 重大件直径 12.6~15.2 m, 重大件运输道路宽度 15~20 m(表 2)。重大件水平运输采用重型平板运输车组(SPMT), 道路设计按扫空半径 174 m、转弯半径 138 m、跨路桁架净空 18 m(图 3)。在不超出用海范围的前提下, 适当加长重件作业平台, 在引堤与市政道路衔接处增加重件运输场地, 重大件运输完成后, 再建设滚装斜坡道根部的办公楼, 为重大件运输预留充分空间。

表 2 部分大型乙烯项目重大件尺寸及道路宽度

项目名称	最重件/ t	最长件/ m	最大直径 或宽度/m	道路 宽度/m
中科炼化	1 400.0	120.0	12.6	15
中委广东石化	3 800.0	117.0	15.0	18
惠州埃克森美孚	3 083.7	93.3	15.2	20
海南炼化	2 000.0	120.0	14.0	17



图 3 净空 18 m 跨路桁架

因现场施工进度滞后, 4#件杂货泊位无法在首艘重大件运输船舶(甲板驳)到港前全部完工, 深入研究重大件运输初期利用部分建成码头临时靠泊重大件运输船舶的可行性(图 4), 利用 OPTIMOOR 软件对 5 000~1.5 万 DWT 甲板驳进行系泊分析, 结果表明: 按照艏缆 2 根、艏倒缆 2 根、艮倒缆 2 根、艮缆 4 根(滚装斜坡道端部)进行布置, 缆绳受力较均衡, 各缆绳张力均未超出缆绳

破断力的50%。并对接卸重大件滚装货需具备的其他条件,如引堤/防波堤完成度、导助航设施、码头作业标准等进行专题论证^[8],保障重大件运输的顺利实施。

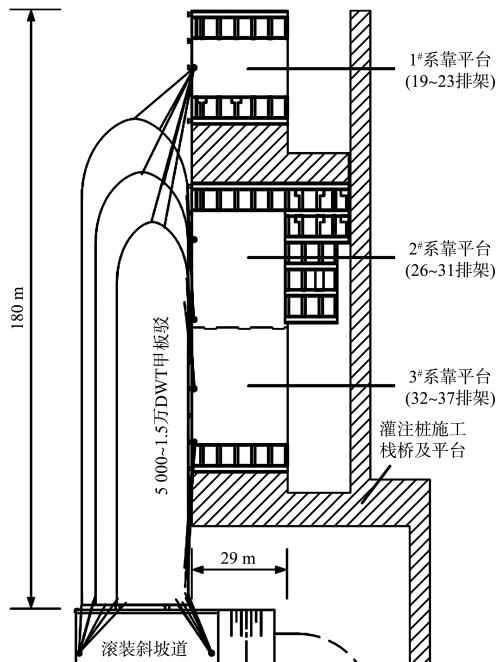


图4 重大件运输初期临时系泊布置

3.3 复杂地质条件下的水工结构设计

3.3.1 防波堤采用斜坡堤与直立堤组合方案

工程防波堤具有以下显著特点:1)长度大:总长近2 km;2)水深大:泥面高程最浅-11 m、最深-20 m,泥面高程低于-18 m的范围占比超过50%;3)波浪大:100 a一遇 $H_{1\%}$ 最大达8.28 m;4)地质变化大:泥面高程-18~-11 m范围表层为良好的持力层;泥面高程-20~-18 m范围表层有约10 m软土,持力层埋藏较深;5)当地石料供应压力大。

综合分析地形、地质、水文、地材供应、施工条件等因素,重点对深水段-20~-18 m范围的防波堤进行直立式沉箱方案、大开挖抛石斜坡堤方案和爆破挤淤斜坡堤方案的比选,最终选用在工期、造价、对生态环境影响方面均具有明显优势的直立式沉箱方案;-18~-11 m范围采用抛石斜坡堤结构,最终形成直立段防波堤与斜坡段抛石堤的组合方案,通过波浪断面物理模型试验^[9]

和局部整体波浪物理模型试验^[10]对斜坡堤与直立堤组合方案进行验证和优化。直立堤与斜坡堤衔接处是结构稳定的薄弱环节,当斜向浪作用时,波浪能量在直立堤段沿程累积,在直立堤与斜坡堤衔接处形成强大的冲击,此时斜向、稍小的波浪可能成为设计控制工况。通过局部整体波浪物理模型试验,研究不同夹角的斜向浪冲击效果和对护面块体的破坏效果(图5),通过加宽衔接处斜坡堤断面,将护面块体由15 t加大为32 t扭王块,确保结构稳定性。斜坡堤与直立堤组合方案充分发挥两种不同结构形式的特点,缩短建设工期6个月以上,节省块石用量超过230万 m^3 ,节省投资约15%,大幅减少开挖范围和用海范围,避免爆破作业,经济和社会效益显著。



a) 斜坡堤



b) 直立堤

图5 局部整体波浪物理模型试验现场

3.3.2 复杂地质条件下桩基设计

工程1#、2#泊位表层为深厚淤泥,厚度普遍在10 m以上,强度低、水深大,原泥面高程约-20 m;3#泊位东南侧至4#泊位区域浅表层普遍存在玄武岩或凝灰岩,但岩层分布、厚度不均匀,风化程度不一。1#、2#泊位处钢管桩自由长度大,

最大长细比超过 100, 钢管桩受力由压弯稳定应力控制。4#件杂货泊位上部功能复杂, 使用荷载大, 灌注桩弯矩和轴力均较大。

针对 1#~3#泊位基桩受力特点, 每排架采用 3 根单斜桩与 3 根单直桩组合的基桩布置形式, 斜桩斜率为 4:1; 基桩直径根据内力计算结果设计为 1.0、0.8 m 两种规格; 将补偿平台与码头平台连成整体, 改善结构受力; 根据钢管桩桩身内力分布, 采用变壁厚的钢管桩结构; 3#泊位东南侧至 4#泊位区域先清除表层礁石, 再施打钢管桩, 与

灌注桩方案相比, 投资相当、施工速度快。

精细划分 4#泊位不同区域荷载条件, 重型平板运输车组 (SPMT) 运行范围的码头面均载按 60 kPa 设计(图 6), 其余范围按均载 20~30 kPa 设计。每排架采用 5~8 根灌注桩, 桩端高程-50~-42 m。掉头平台、变电所平台、桅杆吊平台均与码头平台连成整体, 改善结构受力。

1#~3#液体泊位典型断面见图 7a), 4#件杂货泊位典型断面见图 7b)。

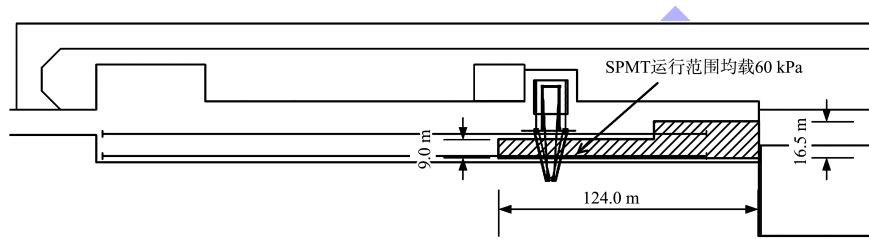


图 6 4#泊位重型平板运输车组 SPMT 运行范围

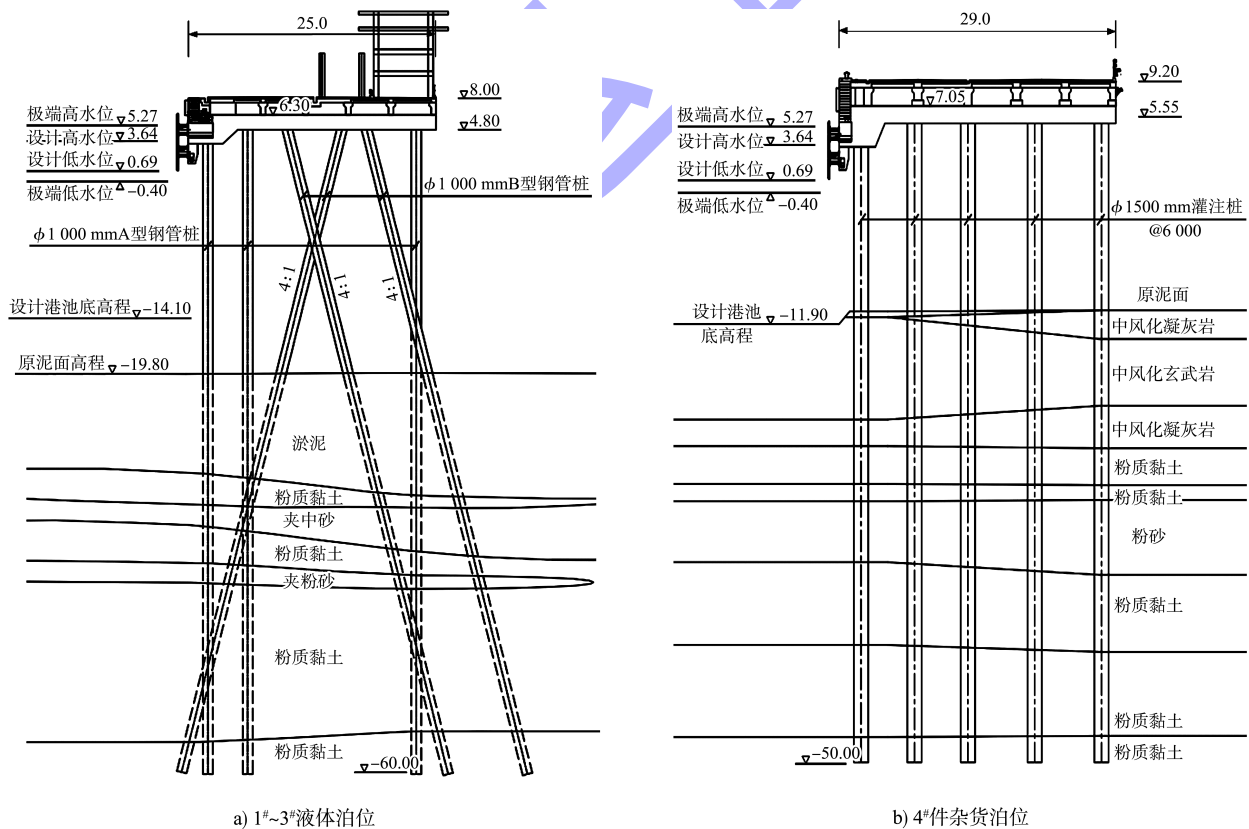


图 7 典型断面 (单位: m)

3.4 深厚抛石堤上工艺管架基础设计

工艺管架坐落在抛石堤结构的引堤,堤心石厚约 16 m。引堤底部原状土层分布变化剧烈,远岸区域存在 2~4 m 厚度的淤泥夹层,近岸区域浅表层为 2~4 m 厚风化岩层。

根据地质条件,管架基础分区设计:1)远岸区域存在淤泥夹层,为避免管架基础工后沉降造成管道破坏,需采用桩基础。桩基可采用常规的灌注桩,也可采用潜孔锤穿过堤心石和风化岩层,再施打 PHC 桩,桩端持力层为粉质黏土持力层。经比较,两者造价基本相当,但因堤心石厚度大,引孔后施打 PHC 桩方案的施工工效明显优于灌注桩方案,因此采用引孔后施打 PHC 桩基础方案。单个管架设置 4 根 $\phi 500$ mm PHC 桩,补偿管架设计为墩台结构,3 排管架落在同一个墩台结构上,桩基均匀布置,改善结构受力(图 8)。2)近岸区域风化岩裸露,无软弱土层,地质条件较好,抛石堤经夯实后不产生工后沉降,管架基础采用扩大基础方案。

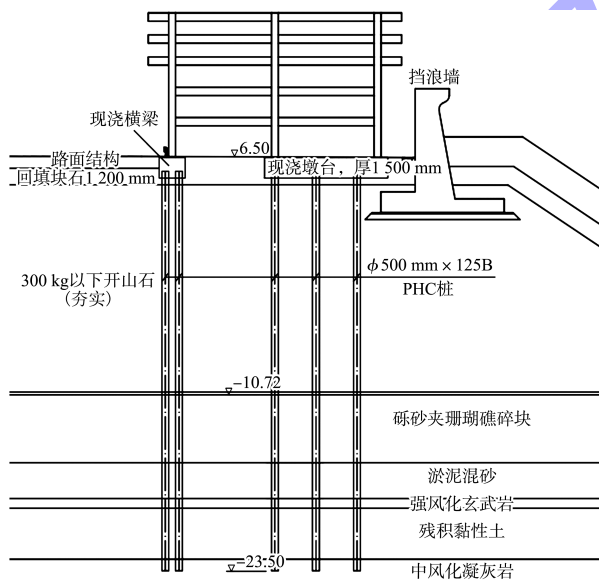


图 8 引堤补偿管架墩台基础典型断面(单位:m)

4 结语

1) 通过优化总平面布置和装卸工艺,解决装卸货种和船型种类多,且跨度较大的问题。

2) 确定重大件运输道路设计参数,利用 OPTIMOOR 软件分析利用部分建成的码头结构临

时靠泊重大件运输船,顺利解决建设期重大件运输保障问题。

3) 通过采用斜坡堤与直立堤相结合的防波堤方案,钢管桩和灌注桩相结合的码头桩基方案,解决复杂地质条件下的水工结构设计问题。

4) 通过潜孔锤引孔施打 PHC 桩基础与扩大基础相结合的设计方案,解决深厚抛石堤上工艺管架基础设计问题。

5) 工程于 2021 年 8 月—2022 年 1 月顺利完成了后方乙烯厂区建设期间 152 件、72 航次重大件接卸任务,并于 2023 年 6 月竣工验收,运行情况良好。实践证明工程总平面布置和装卸工艺设计方案合理,结构设计技术有效,可为类似工程提供设计参考。

参考文献:

- [1] 何文钦,宓宝勇,王勇健,等.中国石化海南炼化有限公司 100 万吨/年乙烯及炼油改扩建工程项目配套码头工程初步设计[R].广州:中交第四航务工程勘察设计院有限公司,2019.
- [2] 何文钦,宓宝勇,王勇健,等.中国石化海南炼化有限公司 100 万吨/年乙烯及炼油改扩建工程项目配套码头工程施工图设计[R].广州:中交第四航务工程勘察设计院有限公司,2021.
- [3] 马进荣,王红川,邹国良,等.中国石化海南炼化有限公司 100 万吨/年乙烯及炼油改建工程配套码头工程波浪数学模型研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2019.
- [4] 郭广献.中国石化海南炼化有限公司 100 万吨/年乙烯及炼油改扩建工程项目配套码头工程岩土工程勘察报告[R].北京:北京东方新星勘察设计院有限公司,2020.
- [5] 覃杰,宓宝勇,黄伟,等.中科合资广东炼化一体化项目码头工程施工图设计[R].广州:中交第四航务工程勘察设计院有限公司,2013.
- [6] 何文钦,查恩尧,谢锐才,等.中委合资广东石化 2 000 万吨/年重质原油加工工程产品码头工程施工图设计[R].广州:中交第四航务工程勘察设计院有限公司,2013.
- [7] 唐傲泽,谷文强,文涛,等.埃克森美孚惠州化工综合体项目重件码头初步设计[R].广州:中交第四航务工程勘察设计院有限公司,2019.

(下转第 255 页)