



外海岛礁大型围填海工程技术处理

刘 阳¹, 朱敏杰²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;

2. 舟山绿色石化基地管理委员会, 浙江 舟山 316021)

摘要:针对外海岛礁大型围填海工程规模大、风浪大、地质条件复杂、用地需求紧迫的特点,开展了围填海工程关键技术的研究。依托舟山绿色石化基地围填海工程,在分析工程规模、水文特征、地质条件及工期需求等基础上,归纳总结围堤、防渗、开山、围垦及地基处理的关键技术问题,提出爆破挤淤、防渗、快速成陆、沉降控制等关键技术问题的解决措施,并结合已实施工程,验证关键技术问题的处理效果。研究成果为外海岛礁大型围填海设计提供指导。

关键词: 围填海; 爆破挤淤; 防渗; 快速成陆; 沉降控制

中图分类号: U 656.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)05-0026-05

Technical treatment for large-scale reclamation of offshore islands and reefs

LIU Yang¹, ZHU Min-jie²

(1.CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2.Zhoushan Green Petrochemical Base Management Committee, Zhoushan 316021, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of a large-scale reclamation project of offshore islands and reefs, such as large scale, heavy wind and waves, complex geological conditions, and urgent land demands, the key technologies of reclamation engineering are studied. Based on the reclamation project of the Zhoushan green petrochemical base, and the analysis of project scale, hydrological characteristics, geological conditions, and construction period requirements, we summarize the key technical problems of diking, seepage control, cutting mountains, reclamation, and foundation treatment, and propose the solutions to the key technical problems such as blasting silting, foundation seepage control, rapid land formation, and settlement control, then verify the treatment effect of key technical problems combined with the implemented projects. The research guides for the design of large-scale reclamation of offshore islands and reefs.

Keywords: reclamation; blasting silting; seepage control; rapid land formation; settlement control

经过前期绿色石化基地选址论证研究,推荐舟山市岱山县大、小鱼山岛为绿色石化基地的建设位置。规划区域用地面积 41 km²,分近、中、远共 3 期建设,其中近、中期建设用地面积 26 km^{2[1]}。为加快推进项目建设,先行开展近、中期建设用地范围的围填海建设,通过开山、筑堤、吹填及地基处理形成陆域。

本文依托舟山绿色石化基地围填海工程,针对围填海工程规模大、外海岛礁风浪大、地质条

件复杂、石化基地用地需求紧迫等特点,分析开山、筑堤、防渗闭气、围垦及地基处理设计过程中的关键技术问题及相应的解决措施,为类似工程问题提供指导。

1 工程特点

1.1 工程规模大

舟山绿色石化基地围填海工程开山成陆面积 3 km²,填海成陆面积 21 km²,水系面积 2 km²,总

收稿日期: 2020-12-01

作者简介: 刘阳(1985—),女,博士,高级工程师,从事港口工程设计。

成陆面积 26 km²; 新建围堤长 13 km, 新建随塘河长 12 km, 新建水闸 5 座, 见图 1。开山方量 9 870 万 m³, 全部用于筑堤及陆域回填。陆域所需吹砂方量 7 240 万 m³, 陆域所需吹泥方量 2 380 万 m³。

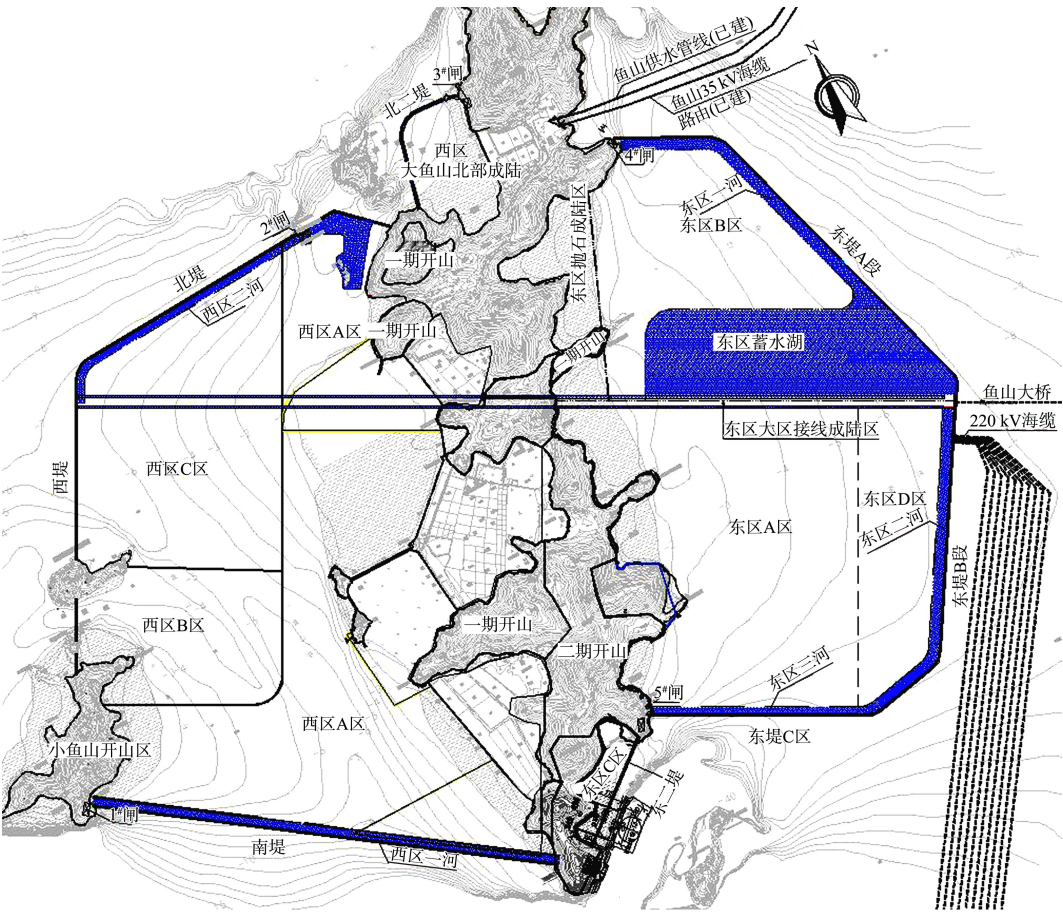


图 1 舟山绿色石化基地围填海平面布局

1.2 建设标准高

舟山绿色石化基地围填海为特大型石油、化工企业提供建设用地, 其防洪标准等级为 I 级, 重现期为 100 ~ 200 a。因此, 围堤安全等级为 I 级, 防潮(洪)标准为 200 a 一遇潮位加 100 a 一遇波浪组合。

200 a 一遇高潮位 3.81 m(85 高程,下同), 设计高潮位 2.34 m, 设计低潮位-1.66 m。

工程位于外海岛礁大、小鱼山岛周边水域, 地处舟山群岛中部, 周边岛屿众多。偏北向分布有崎岖列岛, 东北到东向依次有嵛山列岛、衢山岛等岛屿作屏障, 东到南向有岱山本岛、中街山列岛、秀山、长白山、舟山本岛、金塘岛等, 对外海偏北到东南向外海大浪有一定的掩护作用。但由于偏北向崎岖列岛与衢山岛间以及偏东向衢

山岛与岱山岛间水域相对开阔, 偏北向和偏东向外海大浪仍能直接传入而对围堤产生影响。采用 Mike 21 有关波浪模型计算, 围堤偏北至东北向最大 $H_{1\%}$ 波高基本在 6.6~6.8 m。

1.3 地质条件复杂

围填海范围内的地基土层主要为第四纪海相沉积的软弱土、冲洪积形成的碎石混黏性土、砂土及风化层。根据各土层的成因类型、埋藏深度、分布发育规律、物理力学性质指标及工程地质特征, 地基土层划分为 6 大类及其分属不同地基土层的亚层。

③₁ 淤泥和③₂ 淤泥质粉质黏土层具有含水量高、压缩性高、强度低、排水固结缓慢、灵敏度较高的特点。在围堤区累计厚度达 20.0~35.0 m, 向大鱼山山体方向逐渐减薄, 为拟建场区主要的

不良地基土层。

③₂粉砂层层厚一般为 1~4 m, 且发育不稳定, 以单层或多层透镜体状发育于③₂灰色淤泥质粉质黏土层中, 该层仅在局部围堤区层厚度达 15 m。

④₁粉质黏土层呈可塑偏软-可塑状, 工程性质一般; ④₂灰色砂质粉土层局部分布; ⑤粉质黏土呈可塑偏硬-硬塑状, 土层压缩性中等-低, 工程性质较好; ⑥层粉质黏土呈可塑偏软-可塑状, 局部偏硬, 埋深较深; ⑦层粉细砂呈中密-密实状, 工程性质较好; ⑨层基岩风化层, 工程地质性质良好。

1.4 建设工期紧

围填海以大鱼山为分界, 大鱼山以西先行建设, 大鱼山以东后续建设, 建设总工期为 6 a。

2 围填海关键技术

2.1 围堤关键技术

围堤作为围填海的永久边界, 既是绿色石化基地的安全屏障, 又是鱼山作业区的码头驳岸, 对后续石化基地安全生产起至关重要的作用。围堤堤型选择、筑堤材料、地基处理方式、整体稳定、沉降控制均是围堤设计中的关键技术问题。

绿色石化基地边界围堤分南堤、西堤及北堤、东堤共 3 大部分, 先行建设南堤, 西、北堤次之, 最后建设东堤。围堤可采用斜坡堤、直立堤和混合堤等类型。围堤选型与地基条件、筑堤材料来源、建设边界条件、沉降要求及工程投资等均有密切关系。围堤地基范围内软土深厚、地质条件差, 而斜坡堤对软土地基产生的变形及沉降适应性较强; 围填海范围内大、小鱼山需开山成陆, 开山石料近 9 870 万 m³, 用于筑堤回填, 自产自销, 有利于减少综合投资。因此, 边界围堤均采用抛石斜坡堤。

爆破挤淤工艺可两头同时陆上推进, 受风浪天气影响相对较小, 可满足石化基地快速成陆的需求。南堤先行施工, 受周边环境影响小, 采用爆破挤淤堤快速形成石化基地南侧边界。但南堤

地基范围内软土层中存在砂夹层, 对爆破挤淤落底效果影响较大, 实际施工过程中部分砂夹层未能爆穿, 综合采取反压结合侧爆的措施进行补救^[2], 满足稳定需求。

西堤及北堤与南堤相同, 采用爆破挤淤堤, 地基范围内软土层中砂夹层起伏变化大、厚度不均, 对爆破挤淤的施工控制要求较高。轴线范围内存在一处深槽, 比天然泥面深近 20 m, 深槽如何与爆破挤淤堤合理衔接是重要的技术难点。当深槽软土厚度大于 3 m 时, 堤轴线范围采用爆破挤淤施工, 地基处理完成后, 水抛外坡、内坡抛石平台使其与原天然泥面齐平, 再实施上部堤身。当深槽软土厚度不大于 3 m 时, 通过直抛开山石与原天然泥面齐平, 再水抛外坡、内坡抛石平台使其与原天然泥面齐平, 实施上部堤身。

东堤建设时, 大鱼山西侧围垦已部分交地, 水电设施相对完善, 故而东堤的建设边界条件复杂。北端分布有鱼山供水管线和鱼山 35 kV 海缆路由, 与轴线最小距离 200 m; 中部拟施工连接鱼山岛及岱山本岛的鱼山大桥并敷设 220 kV 海缆, 海缆与轴线最小距离 196 m。爆破挤淤对管线、海缆的振动影响较大, 结合管线布置, 东堤北侧、东侧采用塑料排水板堤, 东堤南侧采用爆破挤淤堤。爆破挤淤堤和塑料排水板堤的接头位置选择在地质条件较好的区段, 且临海侧有足够的空间抛石反压。其中东堤东侧局部堤段为鱼山大桥的接岸段, 鱼山大桥采用桩基础, 工后沉降小, 为减小围堤与大桥的差异沉降, 接岸段围堤采用碎石桩复合地基进行处理。

2.2 防渗关键技术

石化基地对防渗要求高, 总体考虑沿围堤陆侧设置随塘河, 用于防渗闭气。要求采用三连防的防渗措施, 即外海海水不应入侵石化基地、随塘河水体不应流入外海、随塘河水体不应入渗石化基地。随塘河两岸土体的渗透性、稳定性及闭气土自身的抗渗稳定性是防渗设计的关键技术问题。闭气土防渗通过控制渗透系数实现, 随塘河岸坡稳定结合地基处理实现, 闭气土自身的抗渗

稳定性通过设置倒滤结构实现。

较为常见的防渗方案为在围堰上下游设置灌浆帷幕^[3], 工程投资较高。舟山绿色石化基地随塘河结合围堤的建设时序实施, 大鱼山西侧用地需求紧迫, 为加快建设进度, 南堤随塘河及北堤随塘河与陆域吹填同步开展, 交叉施工, 建设方案为: 当陆域吹砂至 0.5 m 高程后, 设置挡泥子堰, 并清除河道范围吹填砂层, 在河道区域吹填固化土至高程 2.5 m, 当固化土满足固化要求后开挖形成河道断面。

大鱼山东侧分南北两区, 北区为高端服务区, 南区为化工区。北区东堤随塘河与陆域吹泥同步施工, 进行地基处理后开挖形成河道断面。南区东堤后方设置子堰, 将陆域与围堤分隔, 围堤与子堰之间河道范围需单独回填以实现闭气。随塘河临围堤建设, 其建设方案不仅要考虑河道开挖的岸坡稳定, 而且要考虑围堤的整体稳定。排水板堤后方 80 m 布置随塘河, 吹填泥堆载预压后开挖形成河道; 爆破挤淤堤后方 60 m 布置随塘河, 吹填固化土固化稳定后开挖形成河道。

排水板堤陆侧沿坡面设置倒滤层, 再吹填固化土或吹填泥进行防渗。爆破挤淤堤陆侧存在挤淤淤泥包, 而淤泥包具有防渗作用, 清除淤泥包后沿天然泥面设置倒滤层增加了清淤工作量和施工难度, 保留淤泥包并沿淤泥包顶面设置倒滤层增加了闭气土渗透破坏的风险。经验算, 舟山绿色石化基地围填海工程爆破挤淤产生的淤泥包可保留至-3.0 m 高程, 即-3.0 m 高程以下无需设置倒滤结构, 闭气土稳定, -3.0 m 高程以上清除淤泥包, 设置倒滤层^[4]。

2.3 开山、围垦及地基处理关键技术

舟山绿色石化基地围填海工程的工程规模大, 施工工期紧。开山方量 9 870 万 m³, 吹砂方量 7 240 万 m³, 吹泥方量 2 380 万 m³; 在 6 a 内须完成所有开山、围垦及地基处理, 工期要求紧。因此如何合理快速成陆、控制陆域沉降及减少对后续施工的影响是开山、围垦及地基处理的关键技术。快速成陆可通过合理划分地块、选择工程性

质良好的成陆材料及减少地基处理时间实现。控制陆域沉降及减少对后续施工的影响可通过合理设计堆载预压高度、有效限制回填材料粒径实现。

结合用地需求, 围填海工程划分为多个标段进行施工招标。开山工程为一个标段。围堤工程分 4 个标段实施, 先行实施南堤工程, 其次实施西北堤工程, 再实施大桥接线工程, 最后实施东堤工程。成陆工程分 5 个标段, 先行实施大鱼山西侧 A 区, 其次实施大鱼山西侧 B 区、大鱼山西侧 C 区, 再实施大鱼山北部成陆区, 最后实施大鱼山东侧区域。

为确保炼化一体化项目一期设备尽早投产, 大鱼山西侧用地需求时间紧迫, A 区和 B 区为一期石化装置、罐区、堆场及相关配套设备区用地范围^[5], C 区现为临建和预制场地、后续为石化装置区。石化装置对场地地基承载力、工后沉降要求较高, 采用吹填砂成陆、插板堆载预压地基处理, 堆载预压高度为 3~6 m。其中 A 区用地需求最为紧迫, 利用已有虾塘、蟹塘边界, 并结合地形特征临时建设施工隔堤, 将 A 区划分为 11 个分区。先吹填近山体区进行地基处理, 再吹填泥面较深的区域进行地基处理, 地基处理成熟一块交地一块。

大鱼山东侧成陆区相对独立, 交叉施工影响小。由于大桥接线工程是鱼山大桥登陆的先决条件, 大桥接线工程最先建设。大桥接线工程将东区进一步分为北区(B 区)和南区(A、C、D 区), A 区、C 区和 D 区为二期石化装置和罐区用地范围。炼化一体化项目一期设备投产后, 二期设备也要求尽早投产, 同样对场地地基承载力、工后沉降要求较高。同大鱼山西侧, 大鱼山东侧采用吹填砂成陆、插板堆载预压地基处理, 由于软土层厚度较西区厚, 堆载预压高度提高至 6~8 m。B 区为绿色石化基地商务、生活、绿化等配套区用地范围, 上部构筑物对场地地基承载、工后沉降要求不高, 对较大工后沉降和不均匀沉降适应能力较好。舟山地区优质砂源供应量有限, 为确保其他吹填砂成陆区用砂供应量, B 区采用吹填泥成陆, 无砂真空预压+深层堆载预压联合处理。

成陆区为避免对后续桩基施工产生影响，地基处理完成后，交地高程以下的回填石料粒径控制不大于 50 cm，交工高程以下石料厚度以 3 m 为控制原则。

2.4 绿色生态关键技术

舟山绿色石化基地围填海工程的绿色生态理念主要体现在：1) 充分利用天然建筑材料筑堤填海；2) 采用三连防的防渗措施，避免石化基地对海洋环境造成生态破坏；3) 避免占用无居民海岛，保留无居民海岛的自然属性；4) 建设蓄淡湖，增加基地绿化覆盖面积；5) 生活服务区围堤采用生

态景观海堤结构，在确保安全稳定的前提下，增加了休闲、亲海、慢行锻炼、景观生态等附加功能。从而，绿色石化基地的山、湖、海、桥以及石化工业等融合为一体，体现了石化基地的绿色属性和大工业中的景观、生态文明特征。

3 围填海建成效果

舟山绿色石化基地围填海工程建设历时 5 a，现已完成大鱼山西侧围垦，并完成上部建设投产使用；大鱼山东侧围垦已初步形成，地基处理尚未完成。石化基地现状航拍图见图 2。



图 2 舟山绿色石化基地航拍图

通过分析监测、检测资料，舟山绿色石化基地围堤可满足防洪(潮)要求，围堤稳定性良好，爆破挤淤堤段工后沉降小，排水板堤段工后沉降相对略大。随塘河沿堤布设，未发现渗透破坏现象，可满足基本防渗要求。开山最大采石量 332 万 m³/月，为筑堤、填海材料提供了有力保障。围垦区分区按时交地，大鱼山西侧地基工后沉降不大于 50 cm，满足设计要求。无居民岛屿周边海水环绕，基地与开山区保留的山体浑然一体，彰显了生态文明特征。

4 结论

1) 围堤采用爆破挤淤地基处理方式可有效控制工后沉降，但若因地质特征导致爆破挤淤填石未能完全置换软土层，可通过反压结合侧爆的措施满足围堤整体稳定。围堤采用塑料排水板地基处理方式，工艺成熟，对周边环境的影响小，通过监测手段明确沉降速率要求，控制工后沉降，并适当增加预留超高，亦可满足使用要求。

2) 布设随塘河满足基地三连防的防渗要求，随塘河两岸采用渗透系数低的填筑材料进行闭气防渗，填筑材料可选择吹填泥加固或淤泥掺入固化剂，两种闭气土均能满足基地防渗要求，但固化土防渗作为新工艺，其防渗效果比吹填泥加固后的防渗效果略低。

3) 快速成陆需合理划分施工标段，结合建设环境、地形地质特征，增设施工隔堤，分区分块交地。选择吹填砂、开山石等成陆填料，基本可避免消耗回填层的地基处理时间，提高地基处理效果的同时，大大压缩了陆域地基处理的时间，为快速成陆、交地提供保障。

4) 控制陆域沉降及减少对后续施工的影响可通过合理设计堆载预压高度、有效限制回填材料粒径实现。地基处理完成后，交地高程以下的回填石料粒径控制不大于 50 cm，交工高程以下石料厚度以 3 m 为控制原则，对后续桩基施工基本不造成影响。