



抛石地基中不透水连海构筑物设计技术

叶上扬，顾宽海，张晶，周旋

(中交第三航务工程勘察设计院有限公司，上海 200032)

摘要：为维护海域海岛自然生态环境，常需要在围堤上建设连海构筑物。连海构筑物的建设往往受到地质、周边复杂环境等条件的影响和限制，导致结构选型困难、防渗止水不易等技术难题。以舟山绿色石化基地用海用岛整治工程为例，针对抛石地基和用海环境受限的复杂条件，开展构筑物结构选型、止水防渗、结构计算、施工工艺等关键技术研究，提出冲孔塑性混凝土桩防渗的现浇空箱结构方案和抛石堤上高压旋喷桩止水临时围堰施工方案，较好地解决了相关技术难题，可为类似工程提供参考。

关键词：连海构筑物；结构选型；止水；防渗；冲孔塑性混凝土桩；空箱结构

中图分类号：U 655.54

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)05-0041-07

Design technology of impervious sea-linking structures in riprap foundation

YE Shang-yang, GU Kuan-hai, ZHANG Jing, ZHOU Xuan

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

Abstract: To maintain the natural ecological environment of the seas and islands, it is necessary to build a sea-linking structure on the dike. However, the construction of the structure is often affected and restricted by the geological and surrounding complex environmental conditions, leading to technical problems such as difficulties in structure selection and seepage prevention. Taking the remediation project of a sea island for the green petrochemical base in Zhoushan as an example, we study key technologies including structure selection, seepage prevention, structural calculation, and construction technology aiming at the complex conditions of the riprap foundation and the restricted sea environment, and propose an empty box structure plan for seepage prevention of punched plastic concrete piles and a construction plan for a temporary water-stop cofferdam with high-pressure jet grouting piles on a rock dump, which better solves related technical problems and may serve as reference for similar projects.

Keywords: sea-linking structure; structure selection; waterproof; anti-seepage; punching plastic concrete pile; empty box structure

随着海洋经济的发展，围填海成为我国尤其是沿海地区拓展空间及发展经济的重要途径，但同时对生态环境产生了较大的影响^[1]。为全面落实海域使用管理、无居民海岛开发利用管理要求，保护海洋生态环境，恢复用海用岛四面环水，并满足恢复海域生态自然属性要求，需要对一些已建工程进行生态修复。

为保证海水贯通、恢复海域岛礁生态自然属性，常常需要在围堤上建设连海构筑物，从而实现岛礁海水相互连通。而连海构筑物的建设往往受到地质、周边复杂环境等条件的影响和限制，导致结构选型困难、防渗止水不易。

本文以舟山绿色石化基地用海用岛整治工程为例，分析受地质、用海环境限制等复杂条件下

的工程特点和难点，开展构筑物结构选型、止水防渗、结构计算、施工工艺等关键技术研究，提出合适的技术方案，较好地解决了相关技术难题。

1 设计条件

1.1 工程概况

舟山绿色石化基地围填海工程位于大小鱼山海域，为舟山绿色石化基地提供建设用地。在建设过程中，原外鱼唇北大岛、外鱼唇礁、中鱼唇礁、里鱼唇屿、外鱼唇北小岛、外鱼唇北礁 6 个无居民海岛被占用，在外鱼唇礁、中鱼唇礁、里鱼唇屿等 3 个无居民岛附近已建成 3 个大型储煤罐及大量地下管道。在保证海水贯通、保持该区

域水质环境、恢复海域海岛生态自然属性的前提下，对原占用无人岛礁进行生态修复，使得岛礁四面环水，且与外海相连^[2]。

鱼唇湖生态修复平面布置方案为原北堤设计轴线在鱼唇礁附近向陆侧偏转 130° 及 138°，避让鱼唇礁并设置连海构筑物（主要由连接直立堤和过水涵闸组成），满足鱼唇湖与海水连通的要求。原北堤设计轴线在东侧端部 256 m 处向大鱼山打旗岗偏转 134°。调整后的海堤轴线与煤仓周边已有道路之间通过开挖至-1.0 m 形成鱼唇湖（开挖面积约 11 万 m²），调整后的海堤轴线与无名峙岛之间开挖至-2.0 m^[3]。鱼唇湖生态修复平面布置见图 1。



图 1 鱼唇湖生态修复平面布置

本工程建设处于自然环境条件相对恶劣的海中，直接受波浪、潮流作用影响，波浪较大，主

要受偏北向波浪影响。连海构筑物处波浪要素如表 1 所示。

表 1 100 a 一遇设计波浪要素

设计水位	不同重现期的波高/m					周期 T/s	波长 L/m	波速 C/(m·s ⁻¹)	水深 d/m
	H ₀	H _{1%}	H _{4%}	H _{5%}	H _{13%}				
100 a 一遇高水位	2.97	4.75 [*]	4.38	4.31	3.92	8.6	61.5	7.2	5.81
设计高水位	2.75	3.63 [*]	3.63 [*]	3.63 [*]	3.41	8.6	53.9	6.3	4.34

注：“*”表示波浪已破碎。

1.2 工程特点与难点

1) 周边环境复杂。本工程需要在拆除已建部分抛石斜坡堤上建设, 连海构筑物位于外鱼唇北大岛和外鱼唇北小岛之间, 2 个小岛之间建设空间狭小, 且需要确保小岛四面环水, 东、西侧需要与已建斜坡堤相连, 北侧为外海, 南侧为已建煤仓。

2) 地质条件复杂、施工难度大。本工程须在拆除已建部分斜坡堤上建设连海构筑物, 原斜坡堤为抛石挤淤堤, 场地回填块石, 抛石层下为中风化凝灰岩。为满足干地施工条件以及连海构筑物止水要求, 需要在抛石层上实施止水, 施工难度大。

3) 建设周期短。根据业主要求, 设计方案需要施工方便、经济合理, 且为尽快完成岛礁生态修复工程、恢复海域海岛生态自然属性, 后方工程建设尽快形成投入使用, 设计到施工总体建设周期为 1 a。

4) 水文条件差, 止水防渗要求高^[4]。本工程建设处于自然环境条件相对恶劣的海中, 受波浪、潮流作用影响, 且在抛石基础上建设, 透水性强, 施工期为形成干地施工条件, 围堰止水以及使用期连海构筑物的止水防渗要求高。

2 设计方案

2.1 连接堤设计方案

连接结构选型须遵循以下原则:

1) 连接堤结构建设须满足岛礁四面环水, 恢复海域生态自然属性要求;

2) 连接堤结构在已建抛石斜坡堤上建设, 并且满足使用期止水防渗的要求;

3) 连接堤结构施工工艺尽量单一、简单, 适应现场施工条件, 施工方便;

4) 积极采用科技新成果, 充分考虑新结构、新技术可能带来的风险以及解决问题的方法^[5];

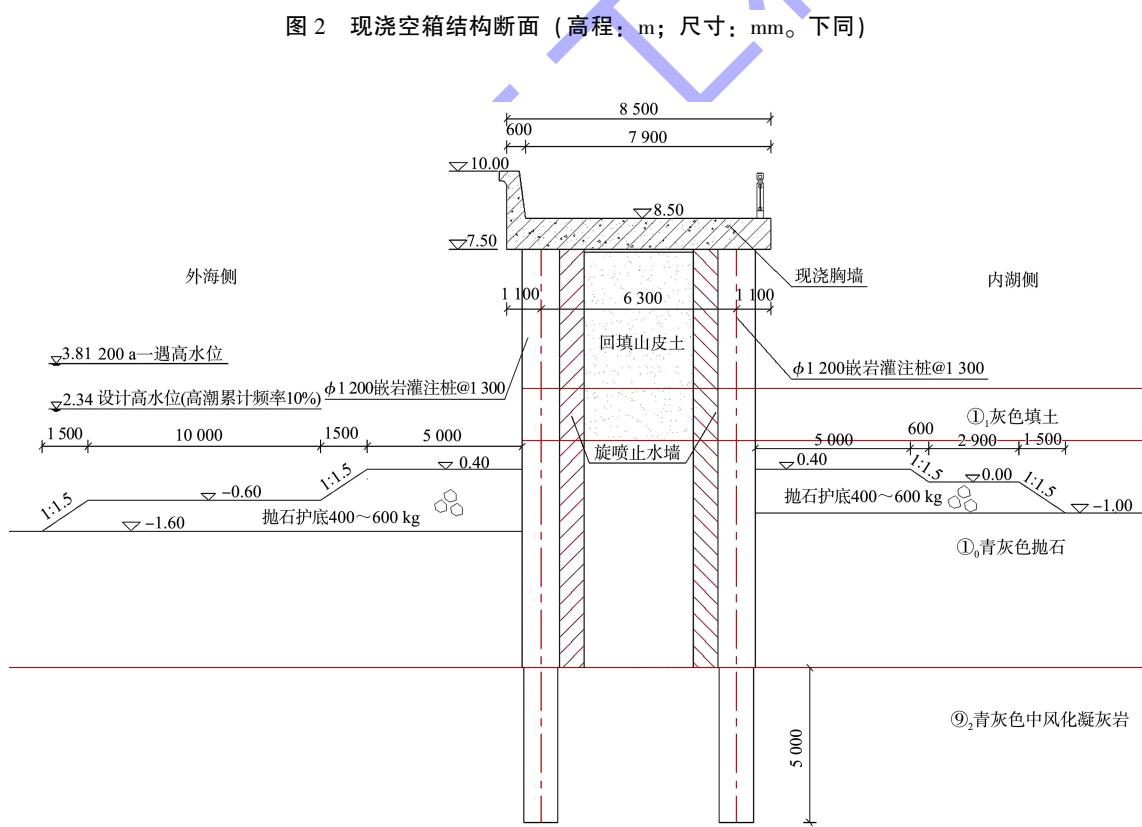
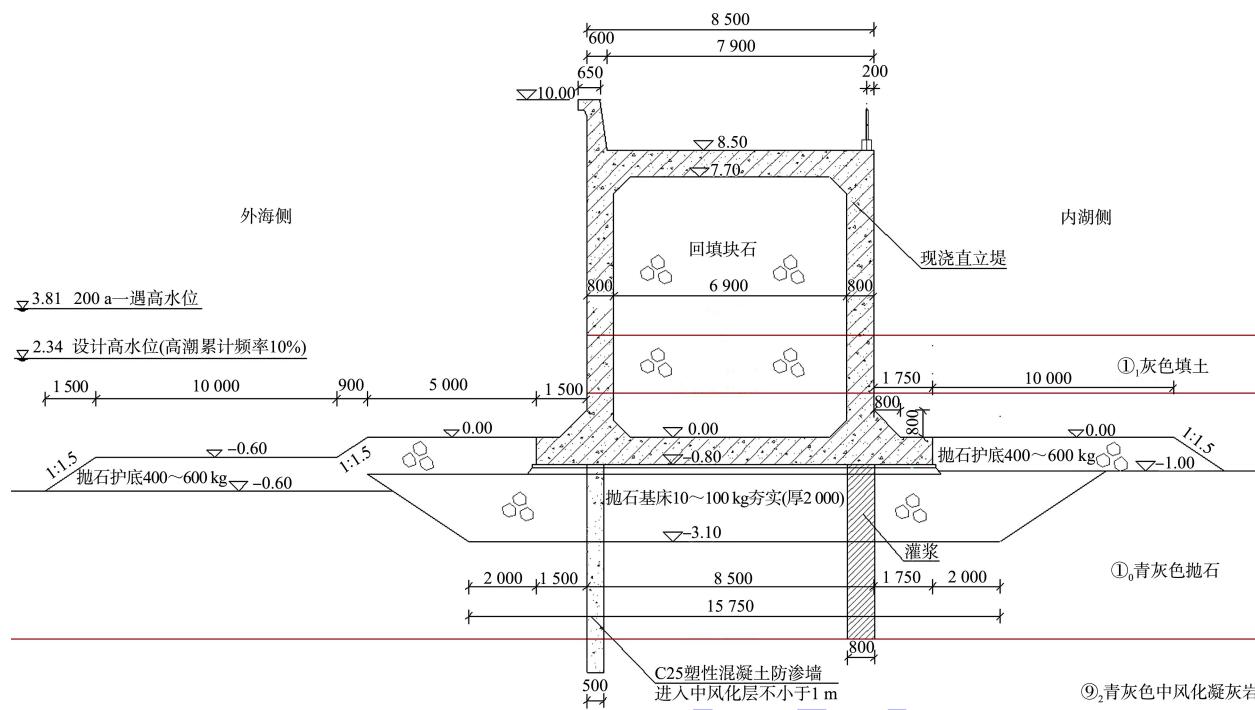
5) 连接堤结构选型应满足工程投资的经济合理性。

根据上述工程特点、难点, 考虑到本工程涵闸布置于外鱼唇北小岛与外鱼唇北大岛之间, 岛屿之间距离仅约 40 m, 斜坡堤用地面积大, 不能满足外鱼唇北小岛、外鱼唇北大岛四周环水的要求, 因此外鱼唇北小岛与外鱼唇北大岛之间约 100 m 范围内的连接堤采用直立式结构。

方案 1 采用现浇空箱结构形式。新建直立堤位于原大堤内侧, 施工过程中可利用原大堤挡水, 形成干地施工条件, 采用现浇混凝土结构。空箱宽 8.50 m, 堤顶路面高程 8.50 m, 靠海侧设直立式防浪墙至堤顶高程 10.00 m, 空箱壁厚及顶板厚均为 800 mm, 空箱内填块石。空箱底板厚 800 mm, 底板设前后趾, 长度分别为 1.50、1.75 m, 底板下设素混凝土垫层 100 mm、碎石垫层 200 mm 及 2 m 厚抛石基床, 底板下设 C25 塑性混凝土防渗墙, 进入中风化层不小于 1 m, 直立堤前后两侧均采用 400~600 kg 的抛石护底, 边坡 1:1.5。现浇空箱结构断面图见图 2。

方案 2 采用双排嵌岩灌注桩结构形式, 基础采用密排嵌岩灌注桩, 桩径 1 200 mm, 间距 1 300 mm, 桩顶高程 7.50 m, 嵌岩深度 5 m, 灌注桩内侧采用高压旋喷桩止水墙止水, 并回填山皮土, 桩顶设现浇挡浪墙结构, 挡浪墙顶高程 10.00 m, 堤顶路面高程 8.50 m, 底板厚 1.0 m。直立堤前后两侧均采用 400~600 kg 的抛石护底, 边坡 1:1.5。双排嵌岩灌注桩结构断面见图 3。

2 个方案在技术上均可行, 但考虑到方案 2 双排嵌岩灌注桩施工工期较长, 且投资较大, 因此本工程连接堤采用方案 1 现浇空箱结构。



2.2 过水涵闸设计方案

为满足外鱼唇北大岛和外鱼唇北小岛的四面环水且岛礁之间海水相连的要求, 本工程在 2 个

岛礁之间建设连海构筑物。连海构筑物采用过水涵闸结构, 涵闸孔口尺寸为 $5000 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm}$ (宽 \times 高), 为现浇钢筋混凝土结构, 箱涵宽

9 500 mm, 箱涵顶路面高程 8.50 m, 靠海侧设直立式防浪墙至堤顶高程 10.00 m, 箱涵顶板厚 800 mm, 两侧壁厚 600 mm, 靠内湖侧设一道钢筋混凝土闸门, 上部设启闭设备。闸门外侧为减少波浪的影响设置消浪格梁, 底板厚 1 m, 底板前趾

长 1.5 m, 后趾长 0.5 m, 底板下设素混凝土垫层 100 mm、碎石垫层 200 mm 及 1.8 m 厚抛石基床, 底板下设 C25 塑性混凝土防渗墙, 进入中风化层不小于 1 m, 箱涵前、后两侧均采用 400~600 kg 的抛石护底, 边坡 1:1.5。过水涵闸结构断面见图 4。

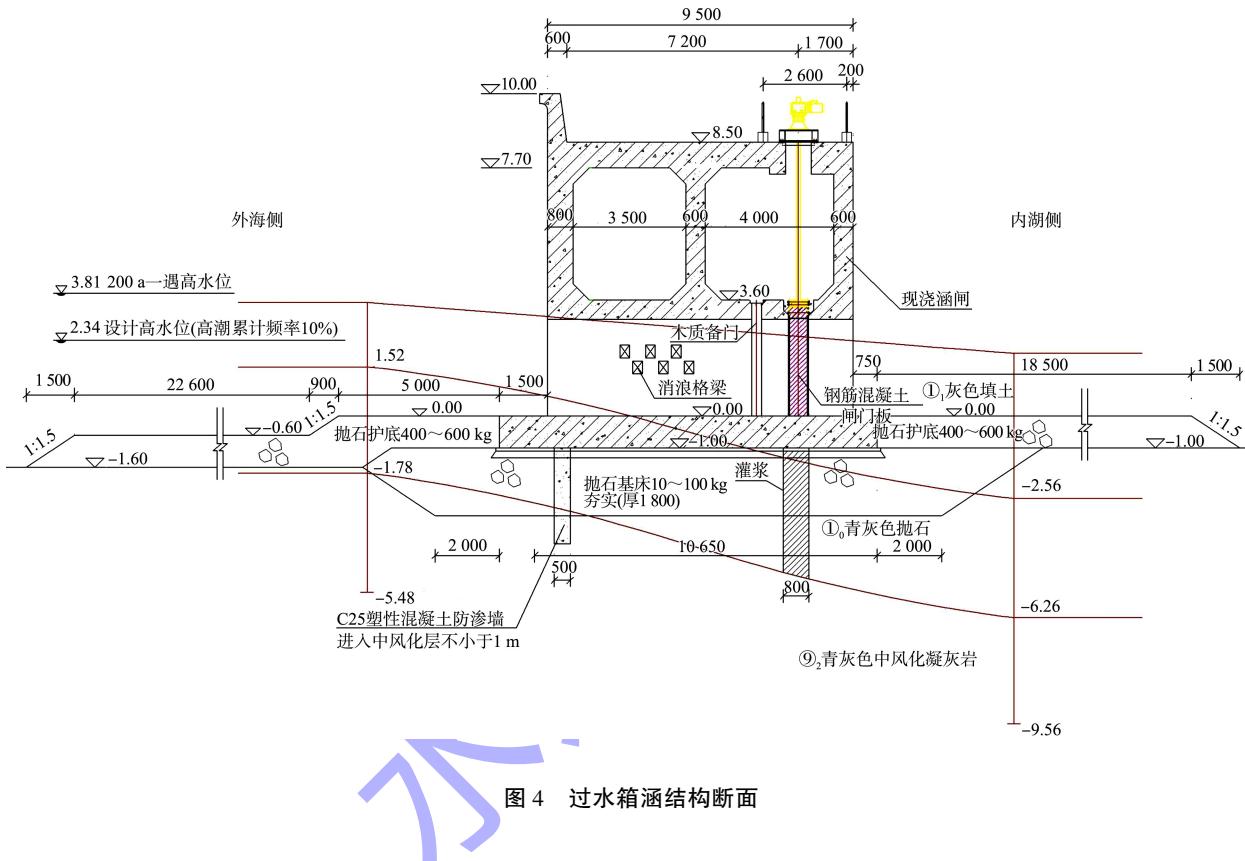


图 4 过水箱涵结构断面

2.3 止水防渗设计方案

本工程建设处于自然环境条件相对恶劣的海中, 受波浪、潮流作用影响; 且工程在抛石基础上建设, 透水性强, 为形成干地施工条件, 围堰止水以及使用期连海构筑物的止水防渗要求高。防渗措施可采用水泥土搅拌桩、高压旋喷桩、钢板桩以及防渗墙。由于需要在抛石堤上止水防渗, 水泥搅拌桩和钢板桩均无法实施, 高压旋喷桩止水效果和耐久性均较差, 因此采用冲孔塑性混凝土防渗墙。

连海构筑物之间设伸缩缝, 伸缩缝之间设水平及垂直止水。空箱底板靠近外海侧设冲孔 C25 塑性混凝土防渗墙, 防渗墙厚 500 mm, 进入中风化层不小于 1 000 mm。塑性混凝土防渗墙渗透系

数 $k \leq 1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$, 防渗墙 28 d 抗压强度不小于 8.0 MPa, 抗拉强度不小于 0.3 MPa, 塑性混凝土配合比根据试验确定。同时, 为防止空箱之间止水连接老化失效, 底板内侧灌浆至基床底确保止水防渗效果。

施工围堰为在原大堤基础上进行加高, 采用开挖块石填筑。为了防止海水渗入基坑, 围堰内侧设一道高压旋喷桩防渗墙, 桩径 800 mm, 间距 600 mm, 防渗墙顶高程 2.50 m, 防渗墙底至青灰色中风化凝灰岩基。

3 结构计算

3.1 模型的建立

连海构筑物前沿抛石护底高程为 0 m, 构筑物

顶高程为 8.5 m，顺水流方向长度为 11.5 m，垂直水流方向为 17.8 m。考虑到过水涵闸结构空间构造较为复杂，为进一步优化结构布置，采用竖向弹性地基梁法，利用三维结构计算软件 Auto Robot 进行建模计算，构筑物立板与底板均采用板单元进行模拟。

由于基础采用抛石基床，在底板上设置竖向弹簧约束，地基基床系数取 50 MN/m^3 ，同时在底板一个角点设置 x 方向和 y 向的水平约束，在垂直水流方向和顺水流方向的板边缘中心设置水平约束。图 5 为连海构筑物结构三维模型。

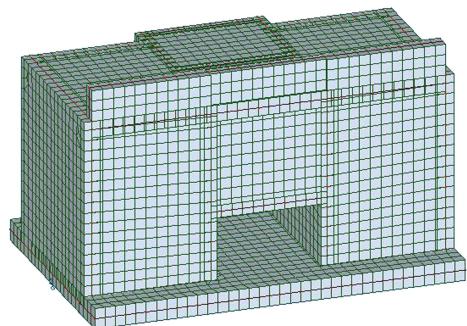


图 5 连海构筑物结构三维模型

3.2 计算结果

连海构筑物整体稳定计算以及结构内力有限元模拟计算结果见表 2~3。

表 2 整体稳定计算结果

工况	抗滑稳定安全系数		抗浮稳定安全系数		最大地基应力/kPa
	计算值	允许值	计算值	允许值	
外海侧水位取 200 a 一遇高潮位 3.81 m，内湖侧无水	1.32	1.20	1.87	1.10	195.31

表 3 结构计算结果(标准值)

计算位置	弯矩/(kN·m)				最大剪力/kN	
	M_{xx} (垂直水流方向)		M_{yy} (顺水流方向)			
	最大	最小	最大	最小		
底板	398.23	-405.81	102.69	-368.27	585.15	
侧墙	90.72	-175.61	67.62	-149.35	572.56	
立墙	65.39	-48.74	116.32	-93.45	148.87	
顶板	255.13	-244.52	224.91	-191.94	381.03	

根据整体稳定计算以及内力结果计算验证连海构筑物结构方案的整体稳定、地基应力以及内力强度、裂缝宽度均满足规范和使用要求。

4 施工过程

4.1 围堰施工

连海构筑物位于原大堤内侧，为节省工程投资，施工时充分利用原有北堤挡水，并且部分通过开挖的抛石堤芯材料回填形成海上施工围堰。为了防止海水渗入基坑，围堰内侧在抛石围堰上设一道高压旋喷桩防渗墙，桩径 800 mm，间距 600 mm。但在开展大面积施工前，一定要进行现场典型施工试验，以便得到合理的施工工艺参数，从而更好地控制止水墙的施工质量。围堰断面见图 6。

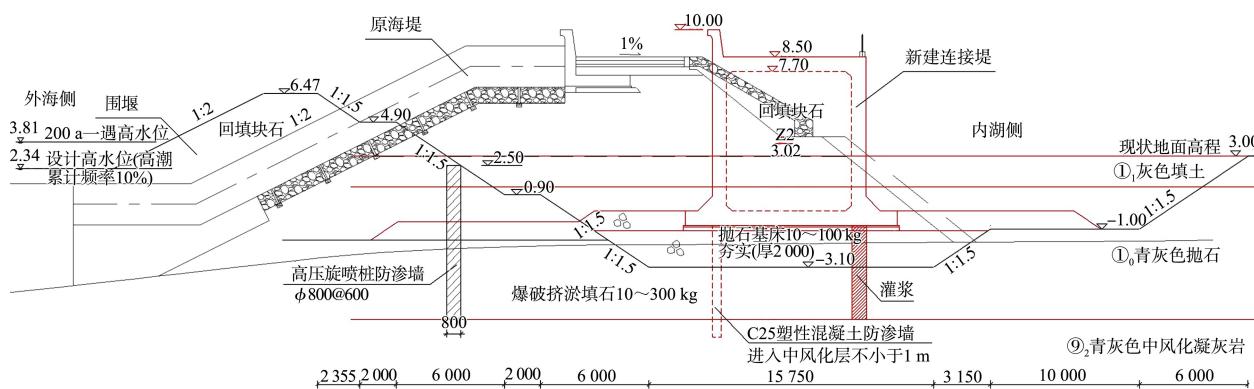


图 6 围堰断面

4.2 冲孔塑性混凝土桩施工

采用冲击成孔施工工艺成桩，桩与桩之间相

互咬合从而形成止水墙，泥浆护壁，导管法浇筑塑性混凝土成墙，采用 C25 塑性混凝土并以水下

浇灌的方式成桩。

4.3 灌浆施工

先打导孔,确保灌浆达到设计要求的深度,灌浆压力采用一次升压法,灌浆时须设置压板隆起测量点,灌浆孔底高程为中风化基岩面。底板下设置2排灌浆孔,孔距150 mm,排距750 mm,干施工灌浆前须设置混凝土压板。灌浆施工要求灌浆后的渗透系数不大于 10^{-5} cm/s,灌浆压力等参数均应通过试验段确定,确保止水的质量。

5 结语

1)为保证海水贯通、维持该区域水质环境、恢复海域海岛生态自然属性,对原有围堤进行改建,采用直立堤结构加过水涵闸结构是合适、可行的。

2)针对周边环境复杂、空间狭窄、抛石地基上建设不透水的连海构筑物,提出冲孔塑性混凝土桩防渗的现浇空箱结构和双排密排嵌岩灌注桩结构方案,丰富了抛石基础中不透水连海构筑物的结构形式。

3)在海上抛石层中采用冲孔塑性混凝土桩进行防渗止水是安全、可靠的,解决了在抛石层中

(上接第30页)

5)舟山绿色石化基地围填海工程具有工程规模大、建设标准高、外海岛礁环境恶劣、地质条件复杂及工期要求紧的特点,需要重点关注围堤稳定、防渗、快速成陆、沉降控制等关键技术问题。

6)通过选择合理的围堤形式及填筑材料,选择合理的闭气土材料、成陆材料、地基处理方式,划分合理的施工标段,可有效攻克围填海工程的关键技术难题。

参考文献:

[1] 中国国际工程咨询公司.舟山绿色石化基地总体发展

防渗止水的技术难题。

4)利用原有抛石堤结构采用高压旋喷桩进行防渗止水作为临时围堰结构是合适的,但在开展大面积施工前需要进行现场典型施工试验,以便得到合理的施工工艺参数,从而更好地控制止水墙的施工质量。

参考文献:

- [1] 王琪,田莹莹.蓝色海湾整治背景下的我国围填海政策评析及优化[J].中国海洋大学学报(社会科学版),2016(4):42-48.
- [2] 中国国际工程咨询公司.舟山绿色石化基地围填海工程用海用岛整改方案[R].北京:中国国际工程咨询公司,2019.
- [3] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司.舟山绿色石化基地鱼唇湖生态修复工程[R].上海:中交第三航务工程勘察设计院有限公司,2019.
- [4] 顾宽海,刘家才,张逸帆.某邮轮码头后沿深厚抛石地基中的临水基坑设计[J].水运工程,2018(10):71-76,107.
- [5] 叶上扬,刘术俭,顾宽海,等.深厚软基上澳门机场护岸设计技术[J].水运工程,2020(5):6-12.

(本文编辑 郭雪珍)

规划[R].北京:中国国际工程咨询公司,2016.

- [2] 刘阳,刘家才,许增会.爆破挤淤堤未爆穿软基中砂夹层的补救措施[J].水运工程,2017(6):203-207.
- [3] 刘大庆,杨光忠,贺毅.岩溶地区高土石过水围堰防渗闭气施工[C]//2008年南方十三省水电学会联络会暨学术交流会,杭州:[出版者不详],2008:107-114.
- [4] 刘阳,刘家才.爆破挤淤堤防渗闭气土的稳定性研究[J].中国港湾建设,2017,37(12):37-41.
- [5] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司.舟山绿色石化基地围填海工程初步设计报告[R].上海:中交第三航务工程勘察设计院有限公司,2017.

(本文编辑 武亚庆)