

## · 施工 ·

# 无围堰吹填技术在连云港某岸线修复工程的应用 \*



顾宽海<sup>1</sup>, 李海玲<sup>1</sup>, 王家宁<sup>2</sup>, 谢立全<sup>3</sup>

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;  
2. 中交烟台环保疏浚有限公司, 山东 烟台 264000; 3. 同济大学 水利工程系, 上海 200092)

**摘要:** 无围堰吹填技术是开敞海域最理想的快速吹填成陆工艺, 结合成熟的无围堰砂土吹填经验, 研发高效、可靠的无围堰黏土吹填技术是提升淤泥质开敞海域吹填效率的重要方向。依托连云港某岸线修复工程, 提出采用团块状硬质土泥饼取代传统泥浆材料的无围堰吹填技术, 并通过现场试验段的多方案对比与施工参数的反复调整, 提升了吹填土体自然排水与沉降效率。结果表明, 基于黏土团块吹填技术所形成的土层在吹填后4~5 d内迅速沉降, 主固结基本完成, 施工机械可安全进入吹填区域; 经过两个半月的自然固结沉降, 吹填地基的承载力可达到45 kPa以上。黏土团块吹填技术能快速成陆, 利于节能减碳、生态环保, 具有良好的应用前景。

**关键词:** 团块状黏土; 吹填; 快速成陆; 地基承载力

中图分类号: U651

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)08-0190-07

## Application of hydraulic reclamation technology without cofferdam in shoreline restoration project in Lianyungang

GU Kuanhai<sup>1</sup>, LI Hailing<sup>1</sup>, WANG Jianing<sup>2</sup>, XIE Liquan<sup>3</sup>

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;  
2. CCCC TDC Yantai Environmental Protection Dredging Co., Ltd., Yantai 264000, China;  
3. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The hydraulic reclamation technology without cofferdam is the most ideal and rapid process for land formation in open sea areas. According to mature experience in hydraulic reclamation of sandy soil without cofferdam, developing efficient and reliable hydraulic reclamation technology of clay without cofferdam is an important direction to improve the efficiency of hydraulic reclamation in open sea areas with muds. Based on a shoreline restoration project in Lianyungang, this paper proposes the hydraulic reclamation technology without cofferdam, in which the traditional mud material is replaced by a lump hard earth cake. In addition, the paper compares multiple schemes in the field test section, repeatedly adjusts construction parameters, and improves the natural drainage and settlement efficiency of soil by hydraulic reclamation. The results show that the soil layer formed based on the hydraulic reclamation of clay lumps settles rapidly within 4-5 d after hydraulic reclamation, and the main consolidation is basically completed, enabling the construction machinery to enter the site safely. After 2.5 months of natural consolidation and settlement, the bearing capacity of the foundation by hydraulic reclamation can reach more than 45 kPa. The hydraulic reclamation of clay lumps facilitates land formation, and it is conducive to energy saving, carbon reduction, and ecological and environmental protection, thus having a good application prospect.

**Keywords:** lump clay; hydraulic reclamation; fast land formation; bearing capacity of foundation

收稿日期: 2022-10-13

\*基金项目: 国家自然科学基金项目 (11172213)

作者简介: 顾宽海 (1973—), 男, 教授级高工, 研究方向为水工结构与近海岩土工程。

通讯作者: 谢立全 (1972—), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为近海工程。E-mail: xie\_liquan@tongji.edu.cn

在海岸修复、人工岛或岛礁工程中, 往往离不开吹填的造陆方法。传统吹填方法为先围后填, 即先建设周边吹填围堰, 形成围区后再进行吹填, 该方法技术成熟、吹填效率高、施工简便、安全环保。但前提是需要提前修建好用于吹填的围堰, 填筑围堰往往需要使用大量砂石料, 且施工工期较长、工程费用较高。随着工程建设要求的不断提高, 为更快、更低成本吹填成陆, 无围堰条件下的吹填技术应运而生, 已在国内外一些工程成功应用<sup>[1-4]</sup>, 并在我国长江等大型航道工程中引起高度重视<sup>[5]</sup>, 无围堰技术的进一步应用将为工程建设方案优化与经济成本控制提供新的思路。

以往的无围堰吹填技术以细砂、中粗砂为吹填材料, 对于砂源紧张的淤泥质开敞海域尚未见无围堰吹填技术实践应用报道。本文以连云港某岸线修复工程为依托, 基于理论吹填效果分析, 经过无围堰吹填硬土-可塑黏土方案的拟定, 通过工程现场相关施工参数的调整与反复试验, 优化工艺, 旨在为淤泥质开敞海域的无围堰吹填大范围施工提供技术示范。

## 1 工程概况

连云港某岸线修复工程位于海州湾西南海域, 拟对新城围堤外侧岸线硬质化、滩面景观较差、湿地生态景观受损问题进行修复, 以逐步恢复生态湿地及岸线的生态功能, 提升岸线生态景观品质。工程建设内容包括生态湿地和生态廊道, 总建设面积约 187.5 万 m<sup>2</sup>, 其中生态湿地区面积约 69.5 万 m<sup>2</sup>, 生态景观带面积约 118.0 万 m<sup>2</sup>, 涉及较长的海岸线修复与地形塑造, 工程平面布置见

图 1。经计算, 需吹填疏浚土约 680 万 m<sup>3</sup>。

从图 1 可见, 工程区域位于海堤外侧的潮间带, 长度约 6.5 km, 天然泥面高程 0~2.0 m, 地形塑造高程为 5.0~6.0 m。该海域潮差较大, 最高高潮位 6.10 m, 最低低潮位-0.36 m, 为规则半日潮流, 大潮平均流速明显大于小潮, 落潮历时明显长于涨潮历时, 涨潮最大流速 0.50 m/s, 落潮最大流速 0.34 m/s, 对于淤泥质岸滩有较强的冲刷性。



图 1 工程平面布置

根据工程区域的地形及地勘资料, 工程区域土层从上至下分布为③<sub>1</sub> 灰黄色流泥和③<sub>2</sub> 层灰色淤泥、黏土、粉砂、粉质黏土等土层, 土体物理力学指标见表 1。从表 1 可见, 连云港海域的淤泥、黏土是吹填的主要取土材料。同时, 工程区域表层③<sub>1</sub> 和③<sub>2</sub> 层的淤泥厚度达 6.2~20.8 m, 为高含水率、高压缩性、高灵敏度及低强度土层, 且含有机质, 工程性质差, 很不利于岸线的稳定, 在此淤泥之上建设围堰进行传统的黏土吹填, 极具挑战性。

表 1 土体物理力学参数

土层号	土层名称	天然密度 $\rho/(t \cdot m^{-3})$	含水量 $\omega/\%$	孔隙比 $e$	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦角/ (°)	水平渗透系数 $k_h/(10^{-7} cm \cdot s^{-1})$	垂直渗透系数 $k_v/(10^{-7} cm \cdot s^{-1})$
③ <sub>1</sub>	流泥	1.42	105.3	2.774	-	-	8.57	2.45
③ <sub>2</sub>	淤泥	1.51	73.5	2.089	10.3	11.0	4.98	3.46
④ <sub>1</sub>	黏土	1.85	35.5	0.946	34.0	14.2	6.32	-
④ <sub>2</sub>	粉砂	1.97	20.5	0.615	2.0	33.0	-	-
④ <sub>3</sub>	粉质黏土	1.90	25.2	0.804	40.1	19.2	5.36	-

## 2 工程技术难点分析

本工程附近无砂可吹，可用的仅是就地取材的淤泥与黏土。根据工程水文条件、地质条件、疏浚料来源和性质以及岸线地形塑形工程量，经分析，生态湿地和生态廊道区的海岸地形塑形若采用传统的先围后填方式，即利用现状海堤、已有水闸导流堤以及新建部分围堤（堰）形成合适的施工分区后再吹填，方案可行。但是，工程要求吹填 12 个月内完成，且要求节约 1 亿元投资，因此，该方案存在以下两个技术难题：

1) 工程区域天然地基淤泥平均厚 13.5 m，围堰易出现滑移、垮塌等风险，且围堰堤身断面底宽达 60 m 以上才能较好地满足稳定性要求。同时，高程高于经地基处理之后的吹填土泥面部分围堰还需拆除，经核算，仅围堰造价就高达 4.6 万元/m，造价过高。

2) 根据景观廊道区的使用要求，要求地表以下 0~1.5 m 深度范围内的吹填疏浚淤泥土地基承载力  $\geq 45$  kPa。为此，若采用传统吹填方式，工程完工后的疏浚土还需要真空预压地基处理，不仅需要足够的地基处理时间，还需要增加二次地基处理的施工成本。

综合上述两个技术难题，若不改进传统的先围后填方式，不仅工期难以从传统的 21 个月缩短至 12 个月以内，工程投资也较难进一步优化节约。为解决好以上两个方面的技术问题，迫切需要对围堰吹填方案进行改进，充分利用就地取材的黏土材料，采用既保证地基承载力达到要求，又可缩减工期、降低造价的吹填方案。

## 3 无围堰吹填方案

### 3.1 方案概况

鉴于传统的围堰吹填方案存在诸多不利情况，综合考虑工程区域的水文条件、地质条件，以及工程吹填面积大，且分布于海岸线的潮间带呈条带状，对围堰需求量大的因素，应用施工速度快、经济性好的无围堰吹填方案是首选的优化方向。

以往的无围堰吹填方案主要是吹填砂（珊瑚

砂）的方案，即吹填从岸边开始，逐步向海方向延伸吹填。由于砂的透水性强，承载力好，停吹后铲车即可驶入进行管道安装作业，做到边吹边接。同时，也可以结合防污帷幕的合理布设，实现环保吹填，减少对环境的影响，降低吹填料的流失率。

本工程海域为典型的淤泥质海岸，附近没有无围堰吹填方案所需要的高透水砂或珊瑚砂。因此，要实现无围堰吹填，必须确保进入吹填区域的土体具有足够的透水性。从这个角度出发，一旦实现吹填土体材料的团块化，块体间有足够的空隙以快速沥水，即绞刀切削海底黏土为团块/饼状，而不是粉碎为黏土泥浆，那么其资源化利用的成本则变得非常低，具有区别于泥浆吹填工艺的显著优势，基于团块状硬质土泥饼的新型吹填工艺见图 2。从图可见，泥饼吹填施工工艺简单，无须提前建设吹填围堰，可直接吹填成陆。该方法选择取土区中强度较高的土层作为吹填原状土，通过优化疏浚绞刀类型与结构参数，调节绞吸式挖泥船的绞刀转速、土体切削厚度与绞刀头横移速度等运行参数，将吹填原状土切削为团块状硬质土泥饼，并经输泥管道进行水力输送，直接吹填至目的地<sup>[6]</sup>。吹填原状土没有被搅碎，而是被切削为团块状，从而使得吹填土体为团块状硬质土泥饼的堆积体，具有很好的透水性。吹填后，由团块状硬质土泥饼堆积而成吹填土陆域，工程施工成本明显较低，并加快了施工进度。硬质土泥饼吹填会在输送管道出口处形成很多山丘状的泥饼堆积体，一般在 2~3 d 后利用挖土机进行挖高填低，对于承载力和沉降要求不高的场地经平整后可直接投入使用，尤其是用于岸线修复中地形塑形工程。

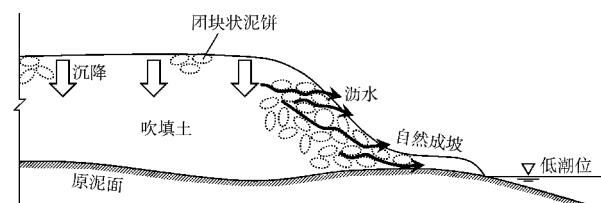


图 2 团块状泥饼的吹填堆积特点

从上述分析来看, 只要黏土团块满足管道输送、快速排水的要求, 海岸线地形塑造的黏土无围堰吹填技术即可以得到很好的应用。但由于连云港海域的潮流、波浪较强, 且水动力复杂, 在此外海无围堰环境下的黏土吹填至今尚无成熟可行的经验, 尤其对吹填土能否迅速成陆, 并满足地表以下0~1.5 m深度范围内的地基承载力不低于45 kPa的经验较缺乏。因此, 设计不仅要对疏浚设备、疏浚工艺等进行选择确定, 而且要求开展黏土无围堰吹填典型试验, 通过试验段进行现场调试各项参数, 为整个工程的无围堰吹填施工提供应用示范与技术支撑。

### 3.2 疏浚设备选择

疏浚设备性能关系到吹填效率、质量、成本等多个方面, 其选择与工程的吹填量、施工强度、取土距离等息息相关。针对本工程吹填量大、日施工强度高以及取土区距离近等特点, 经分析比较, 选用3 500 m<sup>3</sup>/h大型绞吸挖泥船, 挖掘、输送、吹填作业一次连续完成, 施工船舶单一, 船舶利用率高。为提高黏性土开挖工效, 船机配备专用黏土型绞刀, 排泥管线长度约2 000 m, 管径800 mm, 施工时水下泵机转速900 r/min, 挖宽120 m, 挖土厚度(7.0±0.5)m, 日吹填量4.3万m<sup>3</sup>。此外, 为适应近岸区域的挖泥需要, 也配备了1 450 m<sup>3</sup>/h的绞吸式挖泥船。

### 3.3 疏浚工艺

绞吸式挖泥船通过临时进场通道进入取土区, 采用扇形法挖泥方式作业, 即艉部钢桩锚固船体, 钢桩台车实现船体施工前移, 通过船体前部两侧专用锚杆抛设船体前侧施工边锚, 并通过锚机绞车收放实现船体前部横向摆动, 从而实现以船尾锚固钢桩为轴、船首锚机绞动横向摆动形成扇面状的扇形挖泥的施工工艺(图3)。

根据取土区地勘结果, 上部淤泥层厚度约10 m, 下部硬土为可塑-硬塑状黏土, 含少量铁锰质浸染及钙质结核, 厚度约10 m, 埋深-9.0 m高程以下。为达到取硬土吹填的目的, 开挖黏土前

需将上层淤泥开挖吹填至指定区域, 淤泥开挖边坡1:10, 黏土开挖边坡1:5。为保证施工船舶利用率, 减少安拆管线的停工时间, 一艘绞吸船需同时布设2条陆地管线, 其中一条连接至指定的纳泥塘, 另一条连接至工程吹填区。其中, 水上管线约2.0 km, 陆地管线约5.0 km, 水陆管线相接处设架台, 采用柔性接头, 以适应潮差变化。

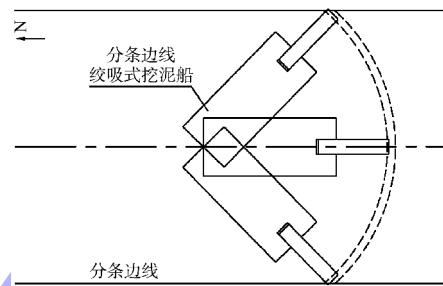


图3 绞吸式挖泥船扇形开挖

### 3.4 取土质量控制

硬土-可塑黏土的物理力学条件对吹填效果尤为重要。由于所取原状可塑-硬塑状黏土高程在-9.0 m以下, 绞吸船开挖下层黏土前, 需要先将上层淤泥疏浚外抛, 此时取土区极易受到复杂的波浪、潮流作用, 发生淤泥回淤至开挖基槽内, 致使淤泥与黏土混合在一起, 增加吹填土细颗粒含量, 影响硬土的取土质量。为减少淤泥回淤量, 取土开挖采用分区、分层、分条交替进行。

分层综合考虑挖泥船性能、疏浚土性质、泥层厚度、施工安全、提高工效、保证工程质量等因素, 原则上每层取土厚度按照2~3 m, 上层淤泥施工时厚度可厚一些, 下层黏土施工时厚度较薄一些, 且在淤泥与黏土交界处严格控制分层位置。分条宽度由船型确定, 一般为施工船水平总长度(即主钢桩与绞刀头之间的垂直距离)的1.1~1.2倍, 即施工分条宽度可在80~120 m, 为便于施工控制, 分条宽度原则上取100 m。为防止漏挖, 每条之间重叠5 m。分区、分层、分条交替开挖疏浚土顺序见图4, 主要步骤为: 1) 取土区东侧开挖2条600 m×100 m槽①②, 上层淤泥吹入指定区域; 2) 开挖中间100 m位置的下层黏土

③, 吹填至岸线地形塑造吹填区; 3) 向西侧移船 100 m 开挖下一条上层淤泥④, 淤泥吹入指定区

域; 4) 船舶回移开挖上一条下层黏土⑤, 吹填至岸线地形塑造吹填区。

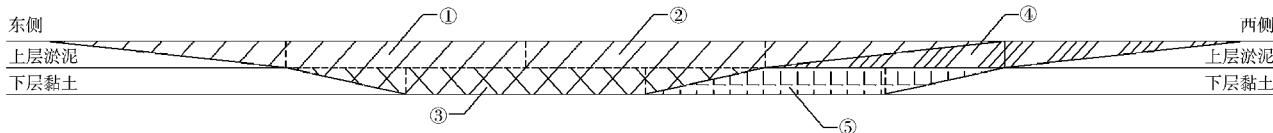


图 4 疏浚土取土工艺

### 3.5 施工期环保要求

无围堰吹填由于缺少围堰, 若处理不当极易造成大量水土流失, 导致周边海域环境污染。为避免吹填施工对工程海域造成环境影响, 采取如下保护措施:

1) 取土区合理分层, 取土区上层(-9 m 以上)淤泥吹填至指定的纳泥塘, 下层(-9 m 以下)力学性质较好的硬土-可塑黏土吹填至工程范围内。

2) 在吹填区与外侧海域间布设一道防污屏, 进一步减少吹填施工对外侧海域的环境影响。

3) 委托有资质的海洋监测单位对施工区周边海域进行环境监测, 确保疏浚施工对周边海域无影响。

## 4 无围堰吹填示范试验

无围堰吹填硬土-可塑黏土试验段位置选定在东侧景观廊道带, 试验段平面范围长 1 500 m、宽 200 m。试验段的主要目的是验证和完善无围堰吹填工艺, 实现吹填料的流失量最低, 且吹填能快速成型, 无需专门的地基处理即可满足海岸线地形塑造的基本要求。

### 4.1 疏浚挖泥运行参数

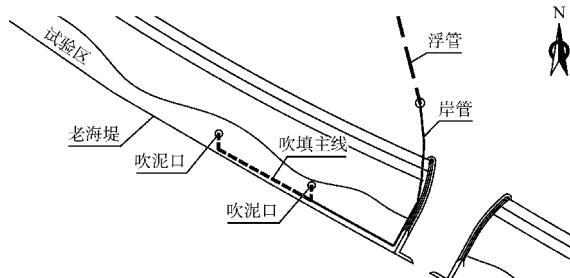
试验段的无围堰吹填试验配备  $3 500 \text{ m}^3/\text{h}$  和  $1 450 \text{ m}^3/\text{h}$  两类绞吸挖泥船。试验结果显示,  $1 450 \text{ m}^3/\text{h}$  挖泥船仅适应于近岸区域的淤泥疏浚, 其功率小而无法实现对下层硬质黏土的挖泥。因此, 试验段吹填任务主要由  $3 500 \text{ m}^3/\text{h}$  大型挖泥船完成。

根据以往黏土挖泥经验, 确定挖泥船排泥管

直径为 700 mm, 采用直径 2.755 m 的 38DS 型绞刀, 安装 6 个刀臂。通过现场挖泥的反复试验, 优化确定疏浚挖泥设备和运行参数为: 1) 6 臂 38DS 型绞刀的每条刀臂采用 8 枚 38DS 型凿形刀齿的不均匀安装方案, 可使得团块/泥饼尺寸更加均匀; 2) 通过多参数联合调试与试运行比选优化, 确定最优疏浚挖泥运行参数, 即切削厚度 6 m, 横移速度  $10 \sim 15 \text{ m/min}$ , 绞刀转速  $30 \text{ r/min}$ , 功率 860 kW, 泥浆平均密度  $1.15 \text{ t/m}^3$ , 泥浆输送流速  $4.5 \sim 5.3 \text{ m/s}$ ; 水下泥泵转速  $930 \sim 950 \text{ r/min}$ , 功率 1 250 kW, 排泥压力  $200 \sim 270 \text{ kPa}$ ; 输泥泵转速  $900 \sim 940 \text{ r/min}$ , 排泥压力  $750 \sim 850 \text{ kPa}$ 。

### 4.2 吹填管线布置

吹填的首要任务是科学、综合规划吹填路线。图 5 分别为吹填管线布设与施工的典型方案: 方案 1(前期)是支线临海先推进, 主线加高收尾, 即吹填主管沿老海堤轴线方向铺设, 吹泥口向海域延伸, 放缓坡吹填至外边界; 方案 2(调整后)是主线先推进, 支线辅助加宽, 即位于老堤附近高滩面上吹填主管吹泥口先吹填推进, 其受波浪、潮水作用时间短, 能快速成陆, 在此基础上再进行支线补吹填的局部加宽。两种方案的顺序相反, 现场工作量接近, 实施效果需示范与验证。



a) 方案1

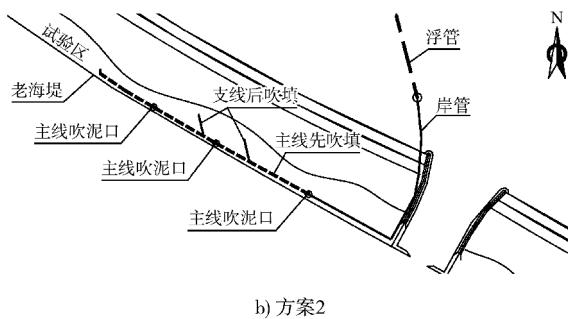


图 5 吹填管线布置

方案1“支线先吹”的实施结果表明,吹填取土材料虽然是性质较好的团块状硬土,但在波浪、潮流作用下的流失率很高,不宜采用。原因有3个方面:1)吹泥口向海域延伸,支线吹填位置低,1 d内被淹没和波浪、潮流作用时间过长,增加了吹填失败的风险;2)被绞刀切削而成的团块状硬土泥饼泡水时间过长(5 h以上),泥饼容易软化,强度降低,难以抵御波浪、潮流的反复作用力,泥饼堆积体也容易发生垮塌、带走;3)位于潮间带外侧,其天然淤泥强度和地基承载力极低,在吹填团块状黏土压载下,更容易向海侧挤压滑移,大大增加了吹填土体的流失数量。

方案2“主线先吹”的实施结果显示,团块状硬土”流失率得到了有效控制。原因有3个方面:1)主线吹泥口位于老堤附近高滩面上,泥面较高,淹没时间短,受潮流、波浪的影响小;2)吹填的团块状硬土泥饼堆积体大部分时间不会被浸泡在水里,可以进行较长时间的沥干与沉实,可快速形成约50 m宽陆域,挖机等重型设备可以进入现场施工,非常有利于局部加宽的补吹填支管铺设与施工(图6);3)利用已吹填场地,可以将沥干的吹填团块状硬土泥饼往海侧推赶,填高低滩区域,减少海水对补吹填料的浸泡时间,节省吹填土方,加快吹填进度。



a) 主线吹填



b) 支线吹填加宽

图 6 试验段吹填过程

## 5 试验段实施成效与推广应用

经过不同方案的对比与完善,无围堰吹填示范试验达到了预期效果,能有效控制吹填土体的流失率,使得海岸线地形塑造的工程成本得以明显降低。如图7所示,大面积的硬质土泥饼形成较为坚实的吹填陆域,吹填后4~5 d,挖土机等大型机械即可进场作业。因此,硬质土泥饼以其较大的粒径与自重力优势,不被泥浆、水流带走,可以快速堆积,其沥水性能很好,水份容易排走,地基处理成本可大幅降低。

吹填完成2.5个月之后,现场试验段典型钻孔的双桥静力触探测试结果表明,吹填黏土厚度为4~6 m,侧壁摩阻力 $f_s$ 为15~20 kPa,锥头阻力 $q_c$ 为0.25~0.35 MPa,参考《软土地基工程勘察规程》静力触探公式<sup>[7]</sup>计算淤泥质黏土地

基承载力为 47~54 kPa, 满足相关地基承载力要求, 明显优于传统吹填工艺。



a) 挖土机作业



b) 硬质土泥饼

图 7 施工现场

## 6 结论

1) 针对淤泥质海岸开敞海域的恶劣波浪与潮流特点, 因地制宜提出无围堰吹填硬土-可塑黏土施工技术, 直接吹填成陆, 快速实现岸线地形塑造,

且无需软基处理, 其地基承载力可达到 45 kPa 以上, 较好地解决了先围后填方案造价高、工期长等技术难题, 可为类似岸线修复工程提供思路。

2) 该施工技术在现场试验中进行了技术改进与效果验证, 研究成果应用于连云港某岸线修复工程, 施工周期缩短 40% 以上, 节约工程投资约 1.98 亿元, 效果良好。

3) 基于黏土团块的无围堰吹填技术能快速成陆, 利于节能减排、生态环保, 比较优势明显, 符合尊重自然、顺应自然的海岸生态修复理念, 可更好地应对海岸生态系统退化的严峻形势, 具有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 黎宗耿. 青岛前湾港区无围堰吹填砂施工 [J]. 水运工程, 1991(5): 37-42.
- [2] 李松涛, 王平, 谭元译. 马来西亚关丹新深水港 6# 陆域无围堰吹填技术 [J]. 水运工程, 2020(11): 166-169, 198.
- [3] 吕国平, 慈庆玲. 沙特扎瓦尔港口工程无围堰吹填施工工艺 [J]. 中国港湾建设, 2014(2): 62-65.
- [4] 窦硕, 杜峰, 张晋勋, 等. 开敞式无围堰珊瑚砂岛礁吹填施工技术 [J]. 施工技术, 2019, 48(4): 32-35.
- [5] 金镠, 楼飞. 无围堰条件下横沙浅滩接纳长江口深水航道维护疏浚土的可能性分析 [J]. 水运工程, 2019(6): 75-80, 157.
- [6] 顾宽海, 谢立全, 肖望, 等. 一种无围堰的吹填土地基以及快速成陆吹填方法: 202210370557.9 [P]. 2022-07-12.
- [7] 中国建筑科学研究院. 软土地区岩土工程勘察规程: JGJ 83—2011 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.

(本文编辑 王传瑜)

## 编辑部声明

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: [www.syge.com.cn](http://www.syge.com.cn), 敬请广大读者和作者周知并相互转告。