

# 几内亚湾强涌浪强冲淤条件下 海港总平面布置\*

毛剑峰<sup>1</sup>, 陶 然<sup>2,3,4</sup>, 王科华<sup>1</sup>, 李伟仪<sup>1</sup>

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510230;

2. 中国港湾工程有限责任公司, 北京 100027; 3. 中国交通建设股份有限公司, 北京 100088;

4. 大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 以尼日利亚莱基港项目为依托, 针对项目所处海域掩护条件和水深条件差、沿岸输砂冲淤明显, 以及波浪周期长、波高大、波向集中的建港条件, 围绕工程建设后对上下游岸滩的治理、平衡以及新建泊位要求较高的集装箱码头等核心问题, 采用数值模拟、物模试验等研究方法, 结合工程造价与工期进行技术经济比选, 确定项目的总体布置思路、进港航道与防波堤走向、码头前沿线等总平面布置要点, 形成科学、经济、合理的总平面布置方案, 提出和总结了在强涌浪、强冲淤海域建设码头的总体平面布置的新思路及设计方案概要, 为类似条件下的海港建设提供参考借鉴。

**关键词:** 总平面布置; 强涌浪; 强冲淤; 人工沙滩; 不可作业时间

中图分类号: U655

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0032-06

## General port layout under strong wave surging and flushing conditions in Gulf of Guinea

MAO Jianfeng<sup>1</sup>, TAO Ran<sup>2,3,4</sup>, WANG Kehua<sup>1</sup>, LI Weiyi<sup>1</sup>

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

2. China Harbor Engineering Co., Ltd., Beijing 100027, China; 3. China Communications Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China;

4. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** This paper focuses on the project of LEKKI Port in Nigeria. In view of the poor shield and water depth conditions in the sea area where the project is located, obvious coastal flushing and silting, long wave period, high wave, and concentrated wave direction, this paper studies the core issues such as the management and balance of upstream and downstream beaches after the construction of the project and the construction of new container terminals with high requirements for berth stability. The paper uses the methods of numerical simulation and physical model tests to determine the general layout points such as the overall layout ideas of the project, the direction of the entrance channel and breakwater, and the location of the terminal front line. As a consequence, the general layout scheme is presented to be scientific, economic, and reasonable. This paper also proposes and summarizes a new idea and design scheme summary for the overall layout of wharf construction under strong wave surging and flushing conditions, which can be used as a reference for port construction in similar conditions.

**Keywords:** general layout; strong wave surging; strong flushing; artificial beach; downtime

### 1 工程概况

中非“一带一路”重要合作项目尼日利亚拉各斯莱基深水港(简称“莱基港”)位于尼日利亚拉

各斯以东约 60 km 的拉各斯自贸区内, 一期工程  
建设 680 m 码头岸线, 最大可停靠 1.8 万 TEU 集  
装箱船, 远期将形成 1.5 km 岸线, 包含有 1 个重

收稿日期: 2022-11-30

\*基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB2600200)

作者简介: 毛剑峰(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口、航道与海岸工程规划与设计工作。

件多用途泊位和3个集装箱泊位(图1),建成后将是非洲西海岸最大的集装箱港口之一,对全面提升尼日利亚的经济、就业和国家竞争力具有重大作用。



图1 莱基港建设远期设计

整个尼日利亚沿海岸线输沙呈现自西向东的特点,由于工程位置没有天然岬口作为掩护,防波堤的建设阻断了沿岸输沙通道,形成明显的岸滩冲淤效应,因此,对上下游岸滩治理和平衡成为总平面设计需要考虑的关键技术问题。

由于水深条件不理想,进港航道长达9 km,且海域波浪周期长、波高大、波向集中,新建的集装箱泊位不仅对泊稳条件要求较高,也给码头、防波堤、进港航道的平面布置带来技术挑战。

## 2 自然条件特点

1) 地形:工程位置直面大西洋几内亚湾,陆域地形平坦,高程与最终码头及堆场陆域高程接近;海域水深变化平缓,从海岸线到-20 m水深处的直线距离约为8~9 km。

2) 波浪:波向较为集中,主浪为西南向,90%以上波浪集中分布在方位角 $180^{\circ}\sim 208^{\circ}$ 之间;高频波浪平均周期达9~13 s,极端涌浪平均周期达16~17 s;100 a一遇有效波高为3.2 m。

3) 海流:近岸海流主要受风及潮水影响,平行于海岸线以东向为主,流速不超过0.25 m/s。

4) 地质:工程区域的土体主要由中密砂、黏性土等构成,局部夹杂软弱黏土层或腐木。总体地质特征描述见表1。

5) 泥沙:工程海域为砂质海岸<sup>[1]</sup>,输沙方式以沿岸输沙方式为主,随季风气候呈现较明显的输沙方向调整,但总体上呈自西向东的方向。回

淤沉积物为细砂到中砂,主要由波浪破碎带内的波浪掀沙及自西向东的海流引起<sup>[2]</sup>。

表1 莱基港地层地质特征

地层分布	地质特征
上部(-10~-1 m)	厚度约6 m的极密砂层,标贯50~100击不等;对陆上沉桩存在一定的影响
中部(-20~-10 m)	土层突变较多,松散或中密砂层夹杂厚度不等的黏土层,其平均标贯为5~10击
下部(-32~-20 m)	以黏土层为主,平均标贯约12击
持力层(-45~-32 m)	密实砂,平均标贯约40击

## 3 总平面设计

### 3.1 人工沙滩

工程位于无掩护海域,波浪周期长、波高大、波向集中,如采用常规的双环抱式防波堤布置方案将阻断沿岸输沙通道,导致防波堤西侧淤积、东侧岸线被冲刷。考虑到长达9 km的进港航道,疏浚量较大,可充分利用多余的疏浚料,通过设置拦沙堤在工程东侧形成人工沙滩式护岸,充当冲刷缓冲区,有效保护工程东侧岸线及陆域,防止受冲刷流失,具有较好的自然相容性,相比传统的抛石护岸更加经济环保,不仅工程总造价低,还节省了疏浚料外抛的费用。在港区运营期,可通过观测西侧的回淤情况和对港池的定期维护性清淤,对东侧的人工沙滩进行养护,保障工程建设后的岸线养护及生态和谐共处。

为进一步验证人工沙滩总平面布局方案(图2)的科学性与合理性,采用沿岸泥沙动力学模拟软件Litpack,对岸滩演变及航道回淤进行模拟分析。对整个海岸线约20 km范围内按照20 m间隔划分,基于风浪及涌浪3 h间隔的实测数据推演结果显示:

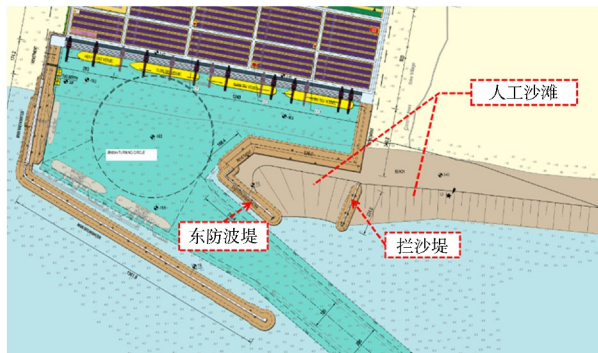


图2 人工沙滩总平面布置方案

1) 工程建成后,岸滩将呈现明显的西淤东冲状态,其中:西侧淤积前 2 a 速度较快,可达约 52 m/a,后续逐年减缓,10 a 后的淤积速度仍为 12 m/a 左右,导致西侧岸滩将在 20 a 向海侧扩张约 460 m;东侧的冲刷同样前 2 a 速度较快,可达约 22 m/a,后续逐年减缓,10 a 后的冲刷速度约为 10 m/a,导致东侧岸线将在 20 a 里向岸侧后退约 220 m<sup>[3]</sup>。

2) 按照西沙东输的思路进行养护,即将西侧淤积的沙滩通过管道泵送等方式输送到东侧人工沙滩,根据每年 65 万 m<sup>3</sup> 冲刷量的预测,大约可在工程建成 7 a 后开展养护,此时西侧海岸线已向海侧推移约 250 m,通过西沙东输,淤积情况将得到缓解,预计工程建成后 20 a 的岸线推移达到约 350 m,而东侧人工沙滩开展输沙养护措施后,可保证岸线后退速度低于 5 m/a,在工程建成后 20 a 的岸线后退不超过工程建设前岸线 20 m,其中养护的砂料约 45% 取自西侧自然沉积的沙滩,剩余的来源于港池及航道的维护性清淤<sup>[4]</sup>。

3) 如果将港池及航道疏浚的约 1 000 万 m<sup>3</sup> 疏浚料全部吹填至人工沙滩,防波堤和拦沙堤之间的人工沙滩由于两侧输沙通道被阻挡保持相对稳定,而拦沙堤以东的人工沙滩岸线较原始岸线将向海侧推移约 360 m,预计需 10 a 才可冲刷至原始岸线位置。

综上所述,通过采用 Litpack 模拟分析,基本验证了人工沙滩总平面布局及西沙东输养护方案的合理性,既防止了回淤增长导致港池航道淤堵,又通过养护维持了东侧的人工沙滩。根据地质资料,自然沙滩以中砂( $D_{50} > 0.34$  mm)为主,因此在人工沙滩吹填形成时还应对回填材料进行筛分,保证吹填砂的粒径略大于自然沙,以维持人工沙滩稳定,尽量避免含泥量较大的细砂吹填上岸,导致出现滩面坡度过缓、回淤港池航道等情形<sup>[5]</sup>。

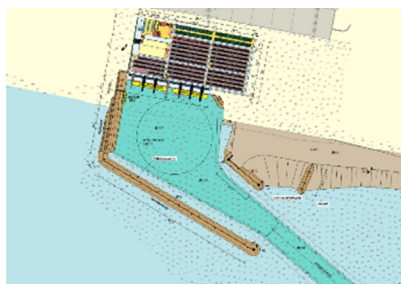
### 3.2 码头前沿线

基于港区用地红线,分析不同码头前沿线的 3 种平面布置方案,综合对比造价和工期等因素,其中:方案 1 采用挖入式港池方案,码头前沿线较

自然海岸线后退约 150 m;方案 2 为码头前沿线沿自然海岸线设置;方案 3 考虑整个项目的挖填平衡,码头前沿线布置于自然海岸线向海侧约 340 m 处。上述 3 种码头前沿性布置方案的优缺点对比见表 2、图 3。

表 2 莱基港码头前沿线布置方案对比

方案	优点	缺点
1	1) 与用地红线契合最好; 2) 码头可陆域施工,不需要等其他前序工序; 3) 由于水深相对浅,防波堤造价最低; 4) 无回填造地及地基处理; 5) 施工工期最快	疏浚量最大
2	1) 疏浚量小于方案 1; 2) 无回填造地和地基处理	1) 用地红线契合度不如方案 1; 2) 码头施工需要进行建设临时围堰; 3) 防波堤造价高于方案 1; 4) 施工工期长于方案 1
3	疏浚量最小	1) 远超用地红线; 2) 码头需要水上施工; 3) 需建设临时围堰用于陆域回填; 4) 需增加地基处理; 5) 工期最长; 6) 防波堤造价最高

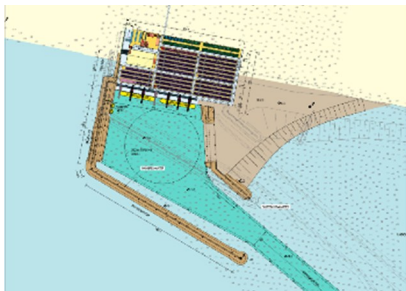


a) 方案1



b) 方案2





c) 方案3

图3 平面布置方案

对于进港航道疏浚工程量较大的新建码头岸线,通常会采用疏浚量相对最小即“挖填平衡”的吹填陆域形成码头及后方作业区域的平面布置方案,而本项目方案1虽然疏浚工程量极大,但是相对防波堤的水深较浅、石料用量少,码头可以采用陆上施工,规避水上沉桩施工进度和质量等方面的风险,且疏浚量除了用于东侧人工沙滩行程外,还可以外运至周边工程项目使用,综合评估方案1的工程造价最优、工期可控,因此最终确定了工程采用半开挖式港池的总平面设计方案<sup>[6-7]</sup>。

### 3.3 防波堤和长航道走向

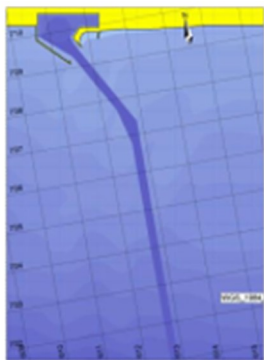
为保证项目严苛的允许不可作业率要求(表3),对17种防波堤及航道走向的平面布局方案(表4、图4),采用波浪场数模、岸滩演变数模、航道回淤数模、操船模拟以及码头系泊物模试验等研究手段,通过交叉对比确定综合最优的防波堤、航道走向及尺度,保证运营期港内水域安全平稳。

表3 莱基港码头各泊位允许不可作业率

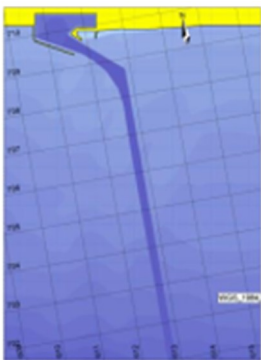
泊位	船舶吨级/万 t	允许不可作业率/%
1 <sup>#</sup> (多用途)	4.5	10.0
2 <sup>#</sup> (集装箱)	10.0	10.0
3 <sup>#</sup> (集装箱)	10.0	2.5
4 <sup>#</sup> (集装箱)	10.0	2.5

表4 莱基港防波堤及航道走向对比平面布局方案

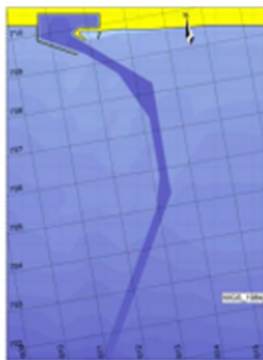
方案名称	方案描述
Original	可研阶段原平面设计方案(主防波堤1.9 km,外航道方位角180°N)
A	实施阶段最终定案(主防波堤1.9 km,外航道方位角160°N)
A100	平面设计方案A的主防波堤延长100 m
A200	平面设计方案A的主防波堤延长200 m
A300	平面设计方案A的主防波堤延长300 m
A+	在平面设计方案A的基础上,增加航道制动水域长度
A++	在平面设计方案A的基础上,外航道调整为210°N走向
A++100	平面设计方案A++的主防波堤延长100 m
A++200	平面设计方案A++的主防波堤延长200 m
A++300	平面设计方案A++的主防波堤延长300 m
A++400	平面设计方案A++的主防波堤延长400 m
Channel 150	平面设计方案A++300的基础上,外航道调整为150°N
Channel 160	平面设计方案A++300的基础上,外航道调整为160°N
Channel 170	平面设计方案A++300的基础上,外航道调整为170°N
Channel 180	平面设计方案A++300的基础上,外航道调整为180°N
Channel 190	平面设计方案A++300的基础上,外航道调整为190°N
Channel 200	平面设计方案A++300的基础上,外航道调整为200°N



a) Original



b) A



c) A++

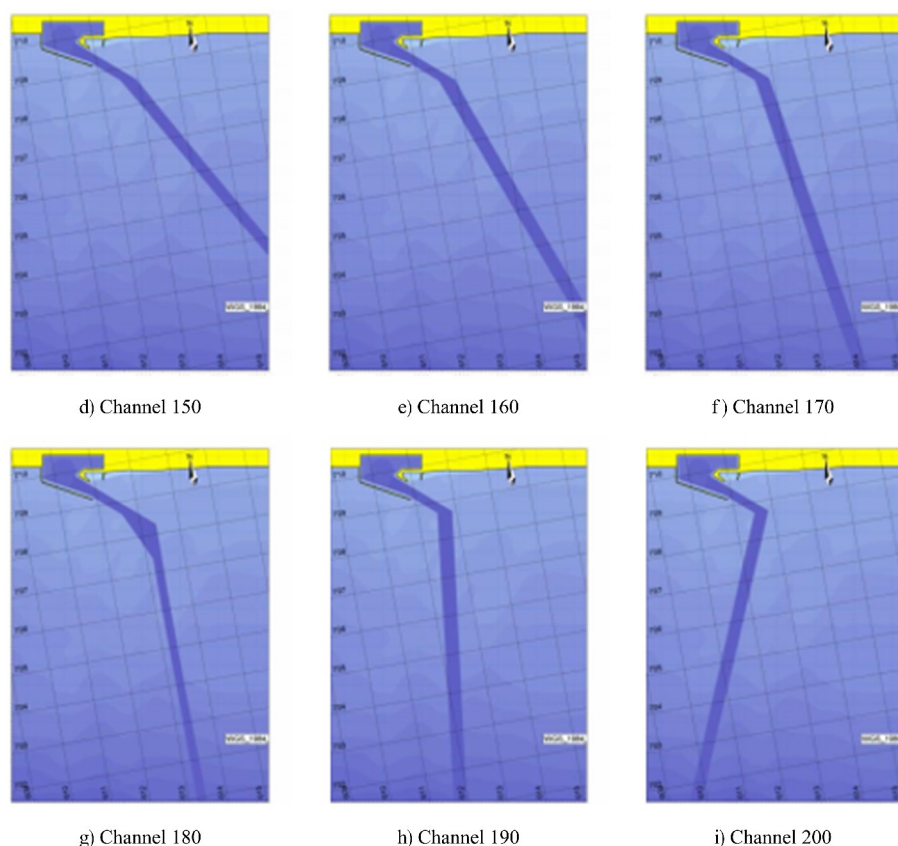
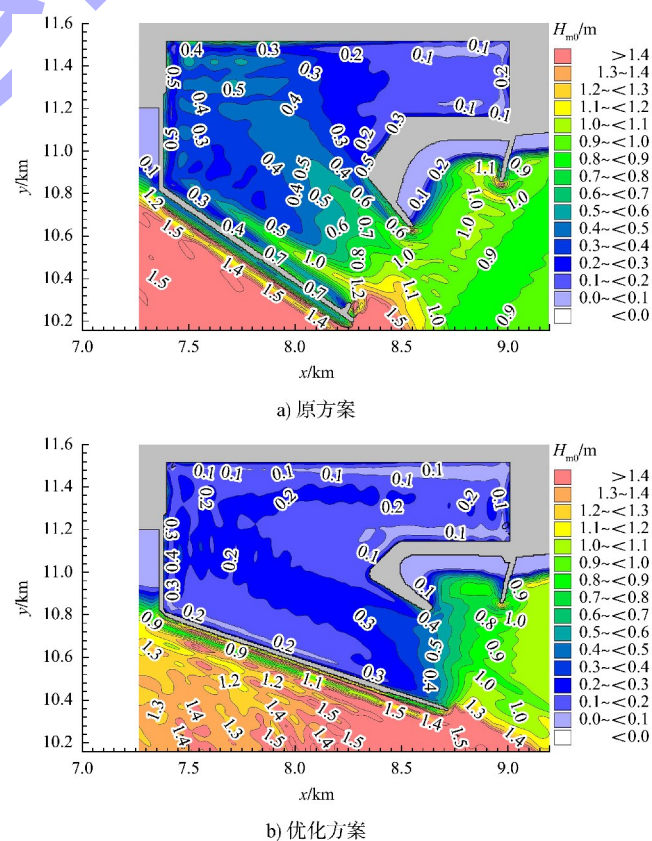


图4 部分莱基港防波堤及航道走向对比平面布局方案

在相关试验研究<sup>[8-10]</sup>过程中, 总结得出以下结论:

1) 深水航道对波浪有明显的折射及反射作用, 防波堤的走向布置应结合航道走向, 尽量避免和减少反射波浪进入港内以及折射波浪对防波堤波浪的影响, 还应综合考虑操船航行要求(图5)。对于短周期波, 考虑深水航道的波浪反射作用, 改变深水长航道的走向布置可有效改善港内波浪情况, 防波堤的延长也对改善港内波高效果显著, 例如延长 300 m 的主防波堤将减少 40% 的港内波高。但对于涌浪海域, 深水航道的走向变化对改善港内波高并不敏感, 防波堤的延长虽然对改善港内波高有一定效果, 但总体不如对短周期波的影响显著, 同样延长 300 m 的主防波堤仅能减少 20% 的港内波高。

2) 由于中国规范<sup>[11]</sup>建议的船舶装卸专业允许波高仅适用于平均周期  $< 9$  s 的波浪环境, 对于波浪平均周期  $\geq 9$  s 的情况, 需进行专门论证, 可采用船舶的运动量指标来衡量。通过物模试验得出了 10 万 DWT 集装箱船在平均周期 9~18 s 的波况下, 码头前沿允许作业波高约为 0.3 m。



注: 典型入射波  $H_{m0} = 1$  m,  $T_p = 15$  s,  $200^\circ$ N 作用下。

图5 港内有效波高( $H_{m0}$ )情况优化对比

3) 物模试验对比了直立式码头结构和高桩斜坡式码头结构。在涌浪作用下,直立式码头结构对船舶量的增加不明显,试验结果显示除1#泊位即多用途泊位的船舶运动量在同等波浪条件下运动量稍增加以外,其他3个泊位船舶运动量并未增大,甚至个别略有减小。

#### 4 结语

1) 对于沿岸输沙动力强烈的海岸线新建码头,充分考虑和评估工程建设后对海岸地貌的影响和改变,宜从基建投资、运营维护以及自然生态相融洽3方面进行评估。

2) 对于在砂质海岸带新建人工沙滩所采用的回填砂粒径宜略粗于自然海岸的泥沙粒径,从而保证人工沙滩的有效成型并保持稳定。

3) 对于输沙冲淤显著且疏浚料质量较好的工程,可采用半挖入式的布置形成码头陆域施工的条件,有效保障施工质量和工期,通过建造人工沙滩等方式二次利用吹填上岸的疏浚料。

4) 总体平面布置在充分考虑操船安全便利前提下,应兼顾航道走线、防波堤走向及长度的互相影响,避免长航道反射波或折射波引起的防波堤波浪以及港内波浪的增加。

#### 参考文献:

- [1] ZANUTTIGH B, VAN DER MEER J W. Wave reflection from coastal structures [C]//Proceedings of at the 30th

international conference on coastal engineering, San Diego: ASCE, 2006.

- [2] BATTJES J A, GROENENDIJK H W. Wave height distributions on shallow foreshores [J]. Coastal Engineering, 2000, 40(3): 161-182.
- [3] 南京水利科学研究院. Coastal dynamic, geomorphology and coastal evolution study [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
- [4] DHI. Siltation study report of channel and port basin of lekki deep sea port [R]. Copenhagen: DHI, 2020.
- [5] 解鸣晓, 杨华, 李孟国, 等. 港口岸线环境补偿人工沙滩工程理论与实践[J]. 水运工程, 2018(4): 26-32.
- [6] 中交第四航务工程勘察设计院. 尼日利亚莱基深水港工程—设计优化报告[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院, 2018.
- [7] 中交第四航务工程勘察设计院. 尼日利亚莱基深水港工程—关于码头岸线位置优化补充报告[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院, 2018.
- [8] DHI. Port of Lekki - Optimisation of Port Layout [R]. Copenhagen: DHI, 2017.
- [9] DHI. Port of Lekki - Design Wave Conditions at New Port Layout [R]. Copenhagen: DHI, 2019.
- [10] 南京水利科学研究院. Ship Mooring Study for Lekki Port, Nigeria [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2018.
- [11] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

(本文编辑 赵娟)

## 著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费,所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部