



# 岩溶地区某码头工程的勘察与 桩基设计优化策略

陈振道<sup>1</sup>, 杨克勤<sup>1</sup>, 黄雯雯<sup>2</sup>

(1. 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290;  
2. 广东省土地调查规划院, 广东 广州 510075)

**摘要:** 结合韶关岩溶地区某码头工程, 对其桩基设计与溶洞处理问题进行深入研究。目标是在复杂地质条件下提高桩基设计的可靠性和安全性。通过结合钻探和多种地球物理探测方法(包括管波探测法和弹性波CT法), 对岩溶区的地质特征进行全面勘察, 并提出在溶洞物理力学性质较弱的区域实施“先逐层冲填片石后注浆”的处理方案。结果表明, 溶洞分布不规则, 大小和深度变化大; 静载试验结果验证了处理方案的有效性。

**关键词:** 溶洞; 勘察; 桩基设计优化

中图分类号: U656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0282-06

## Survey and optimization strategy of pile foundation design for wharf project in Karst area

CHEN Zhendao<sup>1</sup>, YANG Keqin<sup>1</sup>, HUANG Wenwen<sup>2</sup>

(1. CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China;

2. Guangdong Provincial Institute of Land Surveying and Planning, Guangzhou 510075, China)

**Abstract:** Based on a wharf project in Shaoguan within Karst regions, we study the problem of pile foundation design and Karst caves treatment in wharf project to achieve the aim of improving the reliability and safety of pile foundation design under complex geological conditions. By combining drilling and various geophysical detection methods(including tube wave detection and elastic wave CT methods), we carry out a comprehensive survey of geological characteristics of Karst area, and propose a treatment approach involving “layered stone filling followed by grouting” for areas with weaker physical and mechanical properties of Karst caves. The results show that the distribution of Karst caves is irregular with varying greatly in size and depth. Static load test results are validated the effectiveness of this treatment approach.

**Keywords:** Karst; survey; optimization of pile foundation design

码头工程作为重要的基础设施, 其设计的优劣直接关系到整个工程的安全性和稳定性。岩溶地区的码头工程面临着独特的挑战, 例如溶洞的广泛分布和复杂的地质结构, 这些特殊条件大幅提升了工程设计的难度以及风险水平。近年来, 虽然在岩溶地区码头工程的研究领域取得了一

定进展, 但对于桩基设计和溶洞处理的有效方法仍然存在着亟待解决的问题。如何在保证安全性和经济性的前提下, 有效应对岩溶地区的地质挑战, 成为了当前码头工程设计领域的一个关键课题。

鉴于此, 本文以韶关某码头工程为例, 探究

收稿日期: 2024-03-20

作者简介: 陈振道 (1983—), 男, 高级工程师, 从事港口工程水工结构设计和项目管理。

岩溶地区码头工程中桩基设计与溶洞处理的有效策略。通过综合应用地质勘察和先进的物理探测技术, 全面评估岩溶地区的地质条件, 并提出相应的桩基设计和溶洞处理方法。本文的成果对于指导岩溶地区水码头工程的设计具有重要的理论和实践价值, 也为类似工程提供参考。

### 1 工程概况

韶关某码头工程建设 3 个 1 000 吨级散货码头泊位, 货种以煤炭、铁矿石和矿建材料为主。码头前方平台总长 235 m、宽 15 m、顶高程 48.3 m, 港池底高程 34 m。码头采用高桩框架式结构, 排架间距 7.2 m, 基础使用  $\phi 1\ 200\ \text{mm}$  和  $\phi 1\ 000\ \text{mm}$  灌注桩, 每榀排架设 3~4 根直桩。根据地质勘察资料, 工程区域覆盖第四系人工填土层、冲洪积层、残积层, 以及白垩系上统南雄群粉砂岩、砾岩及石炭系灰岩层。

工程区域内存在广泛的溶洞分布, 主要由岩体溶蚀形成。这些溶洞大多填充有褐红色或褐黄色软塑-可塑黏土、灰岩溶蚀、碎石、卵石、砂土及碎石混黏性土; 部分溶洞为半充填或无充填, 呈流塑状。溶洞风化岩面起伏大, 整体呈串珠状发育形态。

面对岩溶地区溶洞的复杂情况, 本工程在灌注桩设计和钻进成孔方面遇到了重大挑战。为解决这些问题, 保证工程安全, 在勘察和设计阶段采取一系列针对性措施, 确保桩基质量和结构的安全可靠性。

### 2 勘察方案

在岩溶地区勘察时, 采用多种技术相结合的方法, 以确保获得准确的地质资料。依据 GDJTG/T A01—2016《广东省岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工技术指南》<sup>[1]</sup>, 针对岩溶地质的复杂性, 实施“一桩一孔+管波探测法+弹性波计算机断层扫描(CT)法”的勘察策略<sup>[2]</sup>。这 3 种方法相互验证, 其中的管波探测法有效探测了以钻孔为中心 1 m 范围内的岩溶情况, 而弹性波 CT 法提供了详细的

地质剖面信息<sup>[3]</sup>。

通过布置 97 个鉴别孔和进行 106 对弹性波 CT 测试, 得到岩溶连通性及岩面和溶洞顶、底面变化的数据。勘察结果显示, 工程区域内岩溶洞分布无规律, 见洞率高达 96.5%, 表明岩溶发育强烈。溶洞以串珠状形态发育, 单个溶洞厚度变化大, 最大溶洞高度达 47.6 m。溶洞顶板厚度不一, 多数未能满足桩基底板厚度要求, 且大部分溶洞全充填, 但物理和力学属性不佳, 不宜作为桩基持力层。勘察钻孔平面布置见图 1, 其中 YK 为一桩一孔, 属超前钻, 用于分辨岩层; SG 为施工图按规范要求布置的孔, 需要做试验辨别土层性质, 获得物理力学指标等; MA 为工可阶段按规范要求布置的钻孔, 需要做试验辨别土层性质, 获得物理力学指标等。弹性波 CT 剖面结果见图 2, 管波探测结果见图 3。结合这些勘察技术的应用, 在岩溶地带获得详尽和直观的地质数据, 这为桩基设计奠定了坚实的基础。

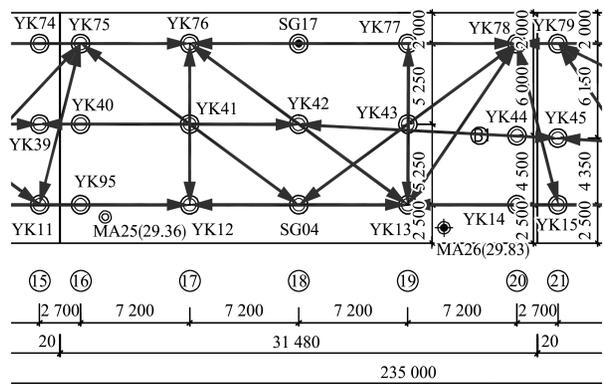


图 1 勘察钻孔平面布置 (单位: mm)

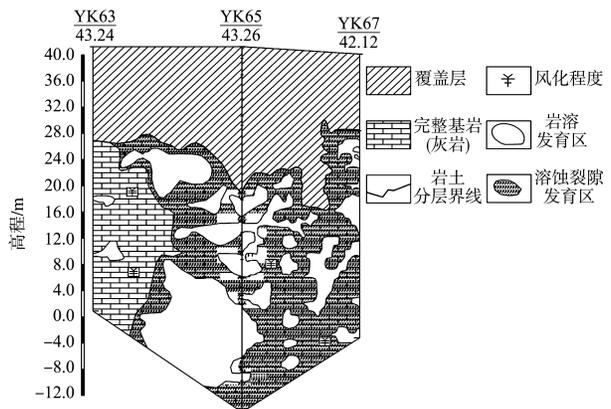


图 2 弹性波 CT 剖面结果

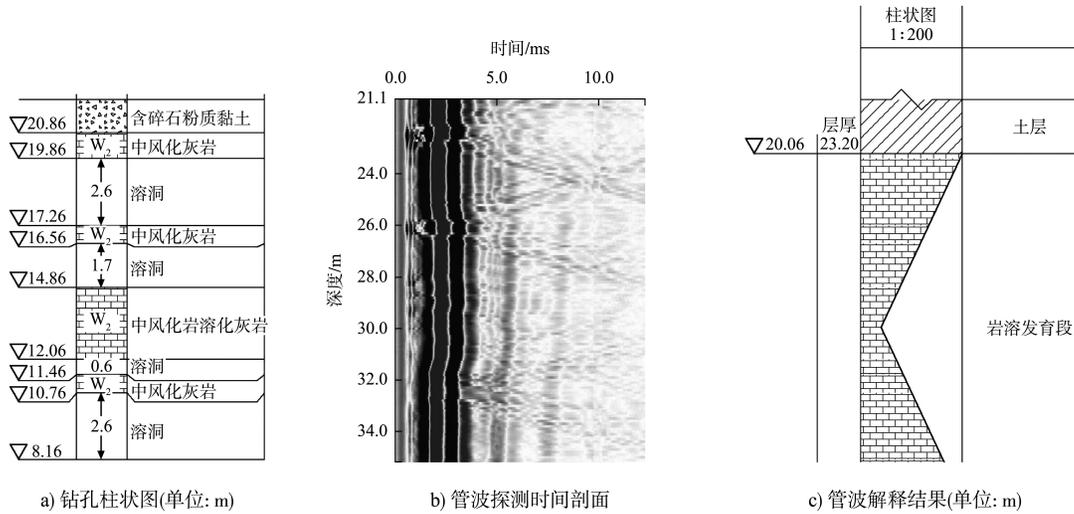


图3 管波探测结果

### 3 设计方案

在该工程中，由于岩溶区独有的地质状况，选择灌注桩作为结构基础，并根据溶洞底板厚度的不同采用嵌岩桩和摩擦桩。溶洞地基下的嵌岩桩设计研究已较成熟，不再赘述。摩擦桩分两种情况<sup>[4]</sup>：1) 覆盖层的摩阻力足以提供桩基的竖向承载力，桩基不需要进入溶洞区；2) 桩底进入溶洞区，终孔在薄顶板或充填物中，此时需要考虑覆盖层及溶洞充填物和溶洞岩体的摩阻力。第1种情况的设计计算与普通灌注桩无太大区别，而第2种情况则需要特别注意桩底与溶洞间的土层和岩体厚度，以及合理选取溶洞区桩侧土的极限摩阻力及桩底支承力。

考虑到本工程区域岩溶强烈发育的特点，大部分钻孔呈葫芦串珠状，最多单孔溶洞达23层，最大单个溶洞高47.6 m。在此区域，大部分溶洞为全填充，在深度达100 m时仍未找到完整基岩持力层。在经济和效益方面，持续深入寻找稳固的支撑层使用嵌岩桩不现实，因而选择以摩擦力为主的摩擦桩方案。对于进入溶洞区的摩擦桩，考虑到桩基须交替穿过岩层，提出在冲孔过程中对桩侧和桩底的溶洞进行“先逐层充填片石后注浆”的工艺：桩侧溶洞先逐层振填片石，充填体积按最外侧土层摩阻力确定；底部充填片石体积按锥体考虑，并考虑充填片石的压缩系数。在钻头

接近溶洞顶板时，调整冲孔方法以实现片石的压实，随后进行注浆处理<sup>[5]</sup>。通过这种工艺，使桩基在溶洞内形成扩大段，从而“卡”住上下段岩层，进而提高桩基承载力。

注浆处理工艺为：注浆浆液采用42.5级普通硅酸盐水泥配制的纯水泥浆，水灰比控制在0.7~0.9，注浆压力设定为3~10 MPa<sup>[6]</sup>。对于注浆质量的控制，采用注浆量和注浆压力的双重控制方法<sup>[7]</sup>。桩侧注浆水泥压入量为4~8 t/桩，终止压力不低于2.0 MPa；桩端注浆水泥压入量为3~5 t/桩，终止压力不低于4.0 MPa，持荷时间设为5 min。桩侧注浆在桩底以上5 m处设置5道注浆环管，间距为6 m<sup>[8]</sup>。注浆顺序上，先进行桩端注浆，后进行桩侧注浆；对于多断面桩侧注浆，应先上后下进行；桩侧和桩端注浆间隔时间不宜少于2 h。当注浆总量和注浆压力均达到设计要求，或注浆总量到达设计值的75%且注浆压力超过设计值时，可终止注浆<sup>[9]</sup>。

通过这个设计方案，能够确保结构基础在复杂的岩溶地区环境中的稳定性和安全性。

### 4 桩基承载力计算分析和试验验证

#### 4.1 桩基承载力计算分析

对于岩溶区域的水运工程，由于缺少专门的规范体系，通常要求桩基建立在稳定的基岩面上，

并视作标准嵌岩桩处理。根据 JTS 167—2018《码头结构设计规范》<sup>[10]</sup>, 桩基承载力的计算公式为:

$$Q_{cd} = (U_1 \sum_{i=1}^n \xi_{fi} q_{fi} l_i) / \gamma_{cs} + (U_2 \xi_s f_{rk} h_r + \xi_p f_{rk} A) / \gamma_{cr} \quad (1)$$

式中:  $Q_{cd}$  为嵌岩桩单桩轴向抗压承载力设计值, kN;  $U_1$ 、 $U_2$  分别为覆盖层、嵌岩部分的桩身周长, m;  $\xi_{fi}$  为桩周围土层  $i$  的侧阻力系数;  $q_{fi}$  为土层  $i$  单位面积极限侧阻力标准值, kPa;  $l_i$  为桩通过土层  $i$  的长度, m;  $\xi_s$ 、 $\xi_p$  分别为嵌岩段的侧阻力、端阻力系数;  $f_{rk}$  为岩石饱和单轴抗压强度的标准值, kPa;  $h_r$  为桩在基岩中的长度, m;  $A$  为桩的截面面积, m<sup>2</sup>;  $\gamma_{cs}$ 、 $\gamma_{cr}$  分别为覆盖层、嵌岩段单桩轴向受压承载力抗力分项系数。

DB52/T 046—2018《贵州省建筑岩土工程技术规范》<sup>[11]</sup> 规定, 对于采用钻孔灌注嵌岩桩基础, 单桩承载力应根据洞隙底部的岩质和岩体完整程度按嵌岩桩基设计。桩身穿过的溶洞顶板岩体一般不计其侧阻力; 对于基本质量等级为 I 级或 II 级岩体构成的竖向溶洞顶板, 其厚度大于 2 m 时, 可以将溶洞顶(隔)板厚度乘以 0.75 的折减系数, 计入相应的侧阻力。

当桩端存在溶洞时, 结合 DB52/T 046—2018《贵州省建筑岩土工程技术规范》的要求, 在计算桩基承载力时参考 GDJTG/T A01—2016《广东省岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工技术指南》进行修正<sup>[12]</sup>。修正后的计算公式为:

$$Q_{cd} = (k_1 U_1 \sum_{i=1}^n \xi_{fi} q_{fi} l_i) / \gamma_{cs} + (k_1 U_2 \xi_s f_{rk} h_r + k_2 \xi_p f_{rk} A) / \gamma_{cr} \quad (2)$$

式中:  $k_1$  为根据溶洞顶板厚度确定的端阻力折减系数,  $k_2$  为总侧阻力发挥系数。

由式(2)可知, 引入端阻力折减系数和总侧阻力发挥系数, 并对覆盖层土的侧阻力发挥系数进行调整, 从而考虑了岩溶地区桩端下存在溶洞对桩基承载力的影响。因此, 在桩端以下存在溶洞, 且溶洞顶板为完整或较完整岩层的情况下, 要求溶洞顶板厚度应不小于 3 倍桩径且不小于 5 m<sup>[13]</sup>。

JTS 167—2018《码头结构设计规范》规定, 对于遇水软化岩层和饱和单轴抗压强度标准值小于

10 MPa 的岩层, 桩的承载力按灌注桩计算。本工程岩溶发育强烈, 基本上为串珠状溶洞, 上部岩层薄且裂隙发育, 甚至相当大一部分为溶化岩, 底部难以找到满足厚度要求的顶板, 因此, 从结构安全考虑, 对于溶洞顶板厚度不满足要求的溶洞的桩基采用灌注桩公式计算桩基承载力, 考虑到本工程灌注桩实施“先逐层充填片石后注浆”的工艺, 桩基承载力按下式计算:

$$Q_d = (U \sum_{i=1}^n \beta_{si} \Psi_{si} q_{fi} l_i + \beta_p \Psi_p q_R A) / \gamma_R \quad (3)$$

式中:  $Q_d$  为单桩轴向承载力设计值, kN;  $\gamma_R$  为单桩轴向承载力抗力分项系数;  $U$  为桩身截面周长, m;  $\beta_{si}$ 、 $\Psi_{si}$  分别为第  $i$  层土的侧阻力增强系数、侧阻力尺寸效应系数;  $\beta_p$ 、 $\Psi_p$  分别为端阻力增强系数、端阻力尺寸效应系数;  $q_R$  为单位面积极限桩端阻力标准值, kPa。

这些计算方法和考虑因素<sup>[14]</sup> 确保在岩溶地区的复杂环境中, 对桩基设计的承载力进行准确和可靠的评估。

#### 4.2 桩基承载力静载试验验证

为了验证桩的实际承载能力是否达到设计要求, 并检验工程桩地质勘察报告中提出的数据, 特别是关于试验桩的桩侧分层摩阻力的数据, 进行自平衡法静载试验<sup>[15]</sup>。

依据地质报告推荐的设计参数, 计算得出 4C-1 桩的单桩承载力标准值为 4 332 kN。试验中, 按照不低于此标准值的原则进行加载控制, 并根据实际情况适当增加荷载, 以此测试桩基在工程实际条件下的承载能力, 并为后续的桩基设计和施工提供指导。在试验中, 当加载至预定控制荷载时, 观察到桩基承载能力仍有较大的富余, 因此继续增加荷载至 1 0368 kN。

根据试验结果绘制的荷载箱荷载与荷载箱上面板位移、荷载箱下面板位移以及桩顶位移与荷载之间的关系曲线, 见图 4。可以看出, 在最大荷载下, 荷载箱上面板的最大位移为 11.49 mm, 卸载后残余位移为 2.47 mm; 荷载箱下面板的最大位移为 -6.00 mm, 卸载后残余位移为 -1.48 mm; 桩顶的最大位移为 7.31 mm, 卸载后残余位移为 1.69 mm。这些位移数据均在可接受的范围内, 从

而证明了试验结果的可靠性。

此外，根据试验中未达到极限荷载时的桩身轴力数据，计算出的桩侧土阻力发挥值见表1。根据荷载箱上、下段桩的试验数据推算出等效单桩轴向承载力设计值可达11 644 kN，满足桩的设计要求。该静载试验表明，采用“先逐层充填片石后注浆”的工艺显著提高了土层的后注浆侧阻力增强系数。但是对于桩基穿过的岩层，桩侧摩阻力增强系数较低，而对于溶化岩和非完整岩层，应适当降低桩侧摩阻力。

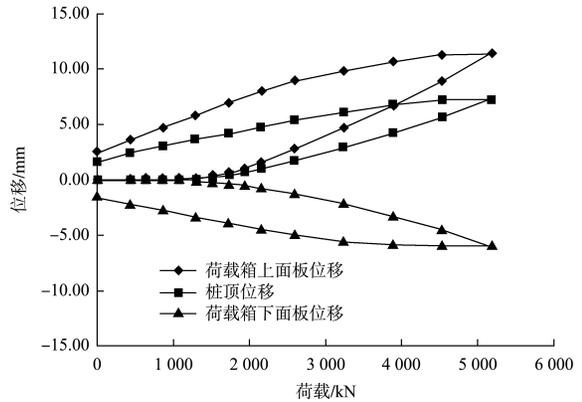


图4 4C-1 试桩荷载-位移曲线

表1 试验最大加载量时4C-1 桩侧土阻力的发挥值

土层高程/m	土层名称	桩侧土阻力规范取值/kPa	后注浆侧阻力增强系数规范取值	桩侧土阻力发挥值/kPa	后注浆侧阻力增强系数发挥值
35.26~<35.26	素填土	20	1.3~1.4	35	1.75
31.26~<31.26	填石	28	1.5~1.6	75	2.68
26.06~<26.06	含碎石粉质黏土	45	1.5~1.6	93	2.07
23.26~<23.26	含碎石粉质黏土	45	1.5~1.6	108	2.40
20.86~<20.86	含碎石粉质黏土	45	1.5~1.6	110	2.44
19.86~<19.86	中风化灰岩	150	-	171	1.14
17.26~<17.26	溶洞填充物	8	1.3~1.4	18	2.25
14.86~<14.86	中风化灰岩	150	-	174	1.16
11.20~<11.20	溶化灰岩	120	-	78	0.65
10.00~<10.00	中风化灰岩	150	-	154	1.03

### 5 结语

1) 针对岩溶强烈发育的地区，本文提出一种将钻探与多样化物理探测技术相结合的勘察方案。此方案有效克服了传统钻探技术的不足，通过多种探测方式的互补与核验，全方位、精确地识别岩溶特征。这不仅为工程设计和施工打下了坚实的基础，也增强了岩溶区域桩基设计与施工的直观性、精确度与效率。

2) 在施工图设计阶段，建议基于钻探数据执行每根桩的管波检测，从而明确桩基周边的岩溶状况。在岩溶较为显著的区域，推荐使用弹性波CT法，以便更准确地探查钻孔之间的岩溶情况。这有助于深入理解工程区内岩溶的发展及其对工程可能造成的影响，并针对每根桩基进行专项设计。

3) 在岩溶强烈发育区设计桩基时，须全面考虑结构负荷、施工复杂性及进度等要素，以确保

对桩基类型做出全面而恰当的判断。针对那些难以找到稳定持力层的串珠状溶洞，建议使用摩擦桩，并在适当情况下实施桩周、桩底注浆的工程措施。

4) 结合具体工程实例，本文运用了钻探与多种物理探测技术的综合勘察方法，准确识别了岩溶发育情况。通过实施“先逐层充填片石后注浆”的溶洞处理技术，取得了显著成效，为同类工程提供了重要的技术参照和经验积累。

### 参考文献:

[1] 广东省长大公路工程有限公司. 广东省岩溶地区公路桥梁桩基设计与施工技术指南: GDJTG/T A01—2016[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.

[2] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 韶关港乌石综合交通枢纽一期工程岩溶专项 管波、跨孔弹性波 CT 勘察成果报告[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2021.

- [3] 陈兆雄. 岩溶发育区弹性波 CT 应用及桩基设计方法[J]. 南方能源建设, 2022, 9(S2): 38-45.
- [4] 吴东升. 岩溶强烈发育地区桥梁桩基础的勘察和设计[J]. 公路, 2019, 64(12): 113-117.
- [5] 杜海龙, 贺茉莉, 罗小斌, 等. 岩溶地区某广场钻孔灌注桩基础补强加固设计与新技术[J]. 中国岩溶, 2019, 38(4): 600-606.
- [6] 赵东升. 毕都高速公路石桥大桥跨铁路桥桩基施工大型溶洞处理技术[J]. 世界桥梁, 2015, 43(5): 15-19.
- [7] 陈蔚. 铁路桥梁桩基施工中的喀斯特溶洞处理[J]. 铁道建筑, 2012(2): 38-39.
- [8] 董海军. 岩溶地区桥梁桩基设计与施工方案分析[J]. 工程与建设, 2013, 27(1): 86-87, 90.
- [9] 洪俊财. 高压旋喷注浆法在桩底溶洞处理中的应用与探讨[J]. 城市道桥与防洪, 2021(2): 147-149, 16.
- [10] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.
- [11] 贵州省建筑设计研究院有限责任公司. 贵州省建筑岩土工程技术规范: DB52/T 046—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [12] 郝大为, 刘华江, 吴亚超, 等. 岩溶地区桥梁桩基设计计算方法分析[J]. 市政技术, 2023, 41(6): 64-68.
- [13] 李国胜. 岩溶地区地基处理及基础设计方法探讨[J]. 建筑结构, 2020, 50(3): 119-128.
- [14] 张仕亮. 岩溶区桥梁桩基勘察和溶洞处治施工技术[J]. 中国水运(下半月), 2021, 21(3): 107-109.
- [15] 广州港湾工程质量检测有限公司. 韶关港乌石综合交通枢纽一期工程 5#~7# 泊位桩基试桩项目自平衡法静载试验结果(试桩桩号: 4C-1)[R]. 广州: 广州港湾工程质量检测有限公司, 2022.

(本文编辑 王璁)

(上接第 228 页)

差距, 实现均衡发展; ③加大技术创新与应用推广力度, 如在 PLC 电控系统等研发上加快实现自主可控, 减少对外部技术的依赖; ④加快数据资源开发利用, 通过构建港口数据大脑, 挖掘和整合港口产业链的数据资源, 促进数据要素产业链的发展, 更好地服务业务场景拓展, 提升港口运营效率和综合服务能力。

3) 智慧港口建设是时代大势所趋、行业发展所向, 更是一场关于管理理念、运营模式及服务创新的全面变革。面对新一轮科技和产业变革的挑战, 需智慧港口产业链各方共同努力, 推动智慧港口的可持续发展, 助力实现港口业务的转型升级和全球贸易的高效流畅。

#### 参考文献:

- [1] 罗本成. 坚持系统观念 加快打造现代化港口发展新格局[J]. 中国港口, 2021(8): 1-5.
- [2] 于传合, 侯志方. 唐山港自动化集装箱码头建设重点[J]. 港口科技, 2021(10): 1-3, 48.
- [3] 上海港帆文化传媒有限公司. 2023 全球自动化集装箱码头报告[R]. 上海: 上海港帆文化传媒有限公司, 2023.
- [4] 袁玉祥, 随振营. 新兴技术在智慧港口的应用现状及发展趋势[J]. 中国水运(上半月), 2022(3): 60-62.
- [5] 刘强, 白秀军. 基于 5G 技术的港口自动化发展及应用研究[J]. 自动化技术与应用, 2023, 42(4): 1-4.
- [6] 袁晓冬. 物联网技术在智慧港口中的应用初探[J]. 通讯世界, 2023, 30(6): 7-9.
- [7] 孙博文. 国际港口发展趋势与智慧港口建设[J]. 珠江水运, 2022(16): 85-87.
- [8] 和洪才. 国际化智慧港口发展对策分析: 以天津港为例[D]. 天津: 天津商业大学, 2022.
- [9] 罗本成, 胡笏, 王克萱. 构建智慧发展指数引导智慧港口高质量发展[J]. 中国港口, 2022(8): 15-18.
- [10] 苟晓璐, 胡娟, 刘长辉, 等. 青岛港智慧港口生产数据采集与交换[J]. 集装箱化, 2023, 34(4): 8-9, 19.

(本文编辑 王传瑜)