



全装配式钢灯塔结构在自动化码头中的应用

丁志全, 陈红兵, 廖振宇, 刘观发

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 通过对目前国内外装配式理论和应用案例研究, 发现全装配式在灯塔结构中的研究应用较少。本研究基于钦州大榄坪某集装箱自动化码头改造项目, 对全装配式钢灯塔结构体系进行研究。首先, 对钢结构装配式建筑技术进行介绍; 其次, 对灯塔结构体系选型进行分析; 再次, 研究全装配式结构主要节点构造; 最后, 提出全装配式钢灯塔结构安装过程。通过理论研究和项目应用得出: 全装配式钢结构灯塔具有较好的经济效益, 可缩短施工工期, 便于工厂作业, 且环保效果好, 适用于工期紧和环保要求高的项目, 可为类似项目提供参考。

关键词: 全装配式; 预制混凝土基础; 自动化码头; 灯塔

中图分类号: U 652; TU 375

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)10-0166-06

Application of fully assembled steel light tower structure in automated terminal

DING Zhi-quan, CHEN Hong-bing, LIAO Zhen-yu, LIU Guan-fa

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

Abstract: Through the current domestic and foreign assembly theory and application case studies, it is found that the research and application of fully assembled structure in the light tower structure is rare. Based on the reconstruction project of a container automated terminal in Dalanping, Qinzhou, the structural system of the fully assembled steel light tower is studied. Firstly, the steel structure prefabricated building technology is summarized. Secondly, the selection of light tower structure system is analyzed. Thirdly, the main structural connections of fully assembled structure are studied. Finally, the installation process of fully assembled steel light tower structure is described. Through theoretical research and project application, it is concluded that the fully assembled steel structure light tower has better economic benefit, shortens the construction period, facilitates factory operations, and has good environmental protection effect. It is suitable for projects with tight construction period and high environmental protection requirements, and provides reference for similar projects.

Keywords: fully assembled; precast concrete foundation; automated terminal; light tower

中国每年新增建筑面积约为 20 亿 m^2 , 其结构大多为现浇混凝土结构, 而这种传统结构存在不少缺点。首先, 建筑领域的工人数量逐年减少, 人工成本增加。其次, 现浇混凝土结构存在较多现场施工工序, 导致劳动强度高, 且存在安全隐患。针对国家提出的建筑绿色节能的新要求, 传统结构的高耗能不能满足国家最新政策要求, 而装配式建筑解决了传统结构的诸多问题得

到大力发展。

装配式建筑主要包括 3 种类型: 装配式钢结构、装配式混凝土结构和预制集装箱式结构^[1]。其中装配式钢结构建筑的结构体系由钢构件组装而成, 具有强度高、质量小、抗震耗能性能好和可以标准化设计等优点^[2]。钢结构构件可预先在工厂中进行加工焊接等工序, 现场安装速度快, 湿作业量少, 满足绿色节能目标。发展装配式钢

结构有利于减少施工污染、节约资源、提升劳动生产效率和质量安全水平^[3]。按照装配化率大小，可以将装配式建筑分为半装配式和全装配式建筑。目前，国外装配式结构普遍用于低层结构^[4-5]，而国内装配式结构目前主要集中在标准化和大体量的民用建筑领域，在特种工业建筑中应用还较少。

为适应绿色环保、施工便捷和经济可靠等要求，本文以钦州大榄坪某集装箱自动化码头改造项目的灯塔为例，提出了一种全装配式钢结构灯塔体系，对灯塔上部钢结构进行选型，提出主要节点构造和施工控制要点，可为类似港区灯塔结构设计和施工提供参考。

1 项目概况

钦州大榄坪某集装箱自动化码头改造项目是广西打造的“千万标箱”港口、互联互通国际陆海贸易新通道关键节点的重要组成部分，主要为广西、云南、贵州、四川、重庆、甘肃等在内的西部地区集装箱货物提供运输服务。项目建成后将成为首座堆场采用 U 形布置的全自动化集装箱码头，具有较高的社会效益和技术创新意义。

灯塔作为港区重要辅建建筑，具有高度高、数量多和工期短等特点，该项目中灯塔数量 25 座，分布在港区各功能区，每座高 29.025 m，底部宽 1.5 m，主要功能是为整个厂区提供照明。

2 塔架结构选型

2.1 结构主要设计参数

本工程钢塔架高度为 29.025 m，使用年限和结构设计基准期均为 50 a；抗震烈度为 7 度，场区设计基本加速度为 0.10g，设计地震分组为第一组，建筑场地类别为Ⅳ类。基本风压为 0.80 kN/m²，地面粗糙度为 A 类。所有杆件均采用 Q235B 钢材。

2.2 结构选型

塔架腹杆均为单斜杆布置，灯塔平面横隔均为四边形布置。腹杆按梁构件设计，释放两端弯矩约束，按铰接处理；弦杆连接按刚接处理；上部结构与基础连接按铰接处理。

结构设计选型主要考虑 2 个因素：塔架顶部的宽度和杆件截面。各方案对应参数见表 1。

表 1 各方案参数

| 方案编号 | 杆件截面 | 塔顶尺寸/(m×m) | 塔底尺寸/(m×m) |
|------|------|------------|------------|
| TJ01 | 角钢 | 1.50×1.50 | 1.50×1.50 |
| TJ02 | 钢管 | 1.50×1.50 | 1.50×1.50 |
| TJ03 | 角钢 | 0.75×0.75 | 1.50×1.50 |

在塔底宽度相同的前提下，不同的塔顶尺寸对结构的经济性和适用性有显著的影响。根据人员上塔通行便利要求，选取 TJ01 和 TJ03 两种不同尺寸方案；不同的塔架构件截面对荷载受力情况和经济性也产生较大影响，因此增加 TJ02 方案。各塔架杆件截面尺寸见表 2。

表 2 主要杆件截面尺寸

| 塔架 | 截面高度/m | 弦杆/mm | 腹杆/mm |
|------|---------------|---------|-------|
| TJ01 | 0~3.000 | L160×14 | L63×6 |
| | 3.000~10.000 | L160×12 | L63×5 |
| | 10.000~16.715 | L125×10 | L63×5 |
| | 16.715~23.430 | L100×8 | L56×5 |
| | 24.430~29.025 | L80×8 | L56×5 |
| TJ02 | 0~29.025 | P140×6 | P70×5 |
| | 0~3.000 | L160×14 | L63×5 |
| | 3.000~10.000 | L160×12 | L56×5 |
| TJ03 | 10.000~16.715 | L125×10 | L56×5 |
| | 16.715~23.430 | L100×8 | L50×6 |
| | 24.430~29.025 | L80×6 | L50×6 |
| | | | |

本塔架作为全装配式钢结构，需将高度为 29.025 m 的塔架分为多个塔段，其中塔段编号分别为 GJ-1~GJ-5，塔架分段高度见图 1。

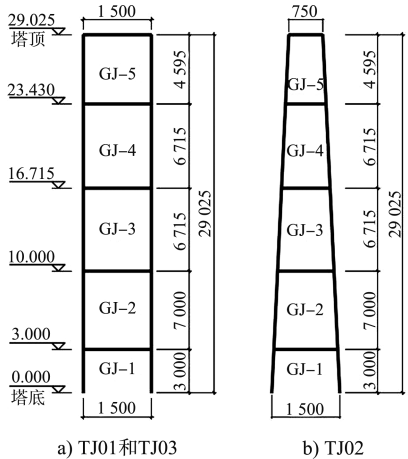


图 1 塔架分段高度（高程：m；尺寸：mm）

2.3 荷载及其组合

2.3.1 风荷载

在钢结构塔架结构不同选型方案的计算中，风荷载的影响最大，风荷载引起的应力占总应力 80% 以上^[6]。

根据 GB 50135—2019《高耸结构设计标准》^[7] 有：

$$W_k=\beta_z\mu_s\mu_zw_0\times1.05$$

(1)

式中： W_k 为垂直于建筑物单位面积上的风荷载标准值； w_0 为基本风压 0.8 kPa； β_z 为高度 z 处的风振系数； μ_s 为体型系数，角钢塔架取 1.3，圆钢

塔架为 0.78，两者均取 0.4 的折减系数； μ_z 为风压高度变化系数，按规范表 4.2.6 取值。

高度 z 处的风振系数：

$$\beta_z=1+\xi\varepsilon_1\varepsilon_2$$

(2)

式中： ξ 为脉动增大系数； ε_1 为风压脉动和风压高度变化的影响系数，两者均不随塔段变化而变化，分别为 2.60 和 0.48； ε_2 为振型、结构外形的影响系数。在实际工程中，塔架分为多个塔段进行组装，因此根据受荷面积 S ，风荷载按公式 $F=\beta_z\mu_s\mu_zw_0S$ 换算为集中荷载，并分别施加至每段顶部 2 个节点上，计算结果见表 3。

表 3 风荷载计算结果

| 方案编号 | 风荷载高度 h/m | ε_2 | β_z | μ_z | μ_s | S/m^2 | 换算集中荷载 F/kN | 节点荷载 $F/2/kN$ |
|------|---------------|-----------------|-----------|---------|---------|---------|---------------|---------------|
| TJ01 | 0~3.000 | 0.07 | 1.10 | 1.17 | 1.30 | 4.50 | 2.39 | 1.20 |
| | 3.000~10.000 | 0.30 | 1.39 | 1.38 | 1.30 | 10.50 | 8.29 | 4.15 |
| | 10.000~16.715 | 0.56 | 1.72 | 1.52 | 1.30 | 10.07 | 10.81 | 5.41 |
| | 16.715~23.43 | 0.79 | 1.96 | 1.80 | 1.30 | 10.07 | 14.97 | 7.49 |
| | 24.43~29.025 | 1.00 | 2.25 | 1.80 | 1.30 | 6.89 | 11.60 | 5.80 |
| TJ02 | 0~3.000 | 0.07 | 1.10 | 1.17 | 0.78 | 4.50 | 1.43 | 0.72 |
| | 3.000~10.000 | 0.30 | 1.39 | 1.38 | 0.78 | 10.50 | 4.97 | 2.49 |
| | 10.000~16.715 | 0.56 | 1.72 | 1.52 | 0.78 | 10.07 | 6.48 | 3.24 |
| | 16.715~23.430 | 0.79 | 1.96 | 1.80 | 0.78 | 10.07 | 8.98 | 4.49 |
| | 24.430~29.025 | 1.00 | 2.25 | 1.80 | 0.78 | 6.89 | 6.95 | 3.48 |
| TJ03 | 0~3.000 | 0.08 | 1.10 | 1.17 | 1.30 | 4.32 | 2.31 | 1.16 |
| | 3.000~10.000 | 0.31 | 1.39 | 1.38 | 1.30 | 9.17 | 7.32 | 3.66 |
| | 10.000~16.715 | 0.58 | 1.72 | 1.52 | 1.30 | 7.61 | 8.28 | 4.14 |
| | 16.715~23.430 | 0.77 | 1.96 | 1.80 | 1.30 | 6.45 | 9.47 | 4.73 |
| | 24.430~29.025 | 1.00 | 2.25 | 1.80 | 1.30 | 4.49 | 7.56 | 3.78 |

2.3.2 活荷载

根据 GB 5009—2012《建筑结构荷载规范》^[8]，取活荷载为 3.0 kPa。

2.3.3 其他荷载及荷载组合

地震和结构自重荷载程序自动考虑。根据 GB 50068—2018《建筑结构可靠性设计统一标准》^[9]，结构分析和设计中采用 2 种极限状态荷载组合计算，即承载能力极限状态和正常使用极限状态。

2.4 主要分析和设计结果

2.4.1 应力与塔顶位移分析

结构位移在风荷载 W_x 和 W_y 作用下对称，因

此给出 W_x 作用下位移即可。塔架应力取荷载组合包络条件下的应力分布。根据软件计算，3 种方案塔架应力和塔顶在 W_x 风荷载作用下的最大水平位移见图 2。

如图 2 所示，3 种模型的杆件最大应力较为接近，均在 160~175 MPa 范围内，小于 215 MPa，满足杆件强度要求。对于塔顶水平位移，2 个角钢模型 TJ01 和 TJ03 分别为 202、208 mm，即位移角分别为 1/138 和 1/134，相当接近；而钢管模型 TJ02 为 173 mm，位移角为 1/161。3 个模型均满足《高耸结构设计标准》规定的 1/75 的位移角限值。

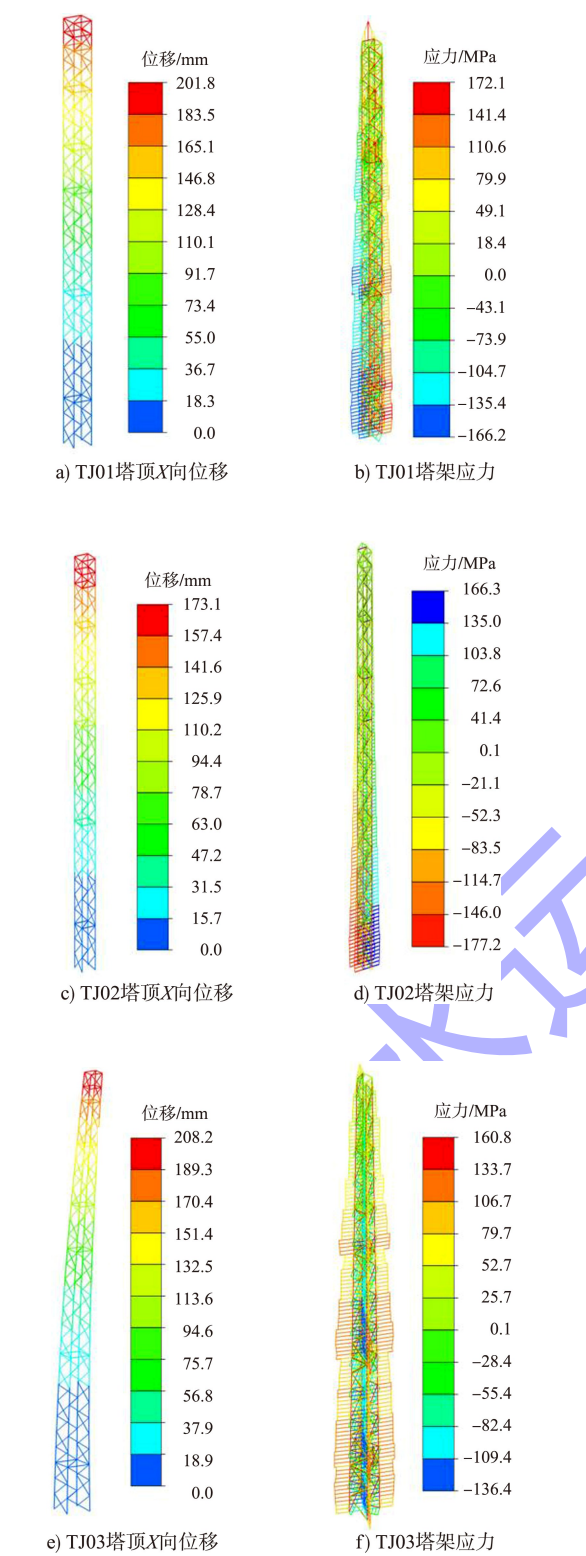


图 2 3 种方案位移与应力云图

2.4.2 用钢量分析

3 种方案的立面几何尺寸变化和塔架材料不同

导致其用钢量存在差异。方案 TJ01 和 TJ03 均为角钢塔架，用钢量分别为 3 382、3 045 kg，后者比前者节省约 10.0%，说明塔架为上窄下宽的 TJ03 方案较为合理。TJ02 钢管塔架的用钢量为 4 159 kg，比 TJ01 高 23.0%，说明角钢截面的经济性明显好于钢管截面。

塔架不同方案的最大应力、最大塔顶水平位移角和用钢量的指标见表 4。

| 表 4 不同方案指标 | | | |
|------------|----------|-----------|--------|
| 方案编号 | 最大应力/MPa | 最大塔顶水平位移角 | 用钢量/kg |
| TJ01 | 172.1 | 1/138 | 3 382 |
| TJ02 | 166.3 | 1/134 | 4 159 |
| TJ03 | 160.8 | 1/161 | 3 045 |

根据表 4 可知，在满足杆件应力和塔顶水平位移角的前提下，当其它设计条件相同时，TJ03 方案用钢量最小，经济效益最好，满足功能使用和经济性要求。本项目最终选择上窄下宽的角钢塔架 TJ03 方案灯塔架。

3 塔架主要构件和节点

3.1 预制混凝土基础

为简化现场的柱脚定位和安装，本工程采用带短柱的预制混凝土独立基础，免去现场支模与浇筑的湿作业量。

首先，为了适应软弱地基，在基础下方先铺设碎石垫层，减小基底面积的同时可提高结构设计的适用性。其次，根据工程柱脚实际的弯矩与轴力，确定基础平面尺寸和基础高度，基础底部配置双向钢筋。再次，确定基础短柱高度，按计算配置短柱竖向纵筋、拉筋和箍筋，同时，在基础短柱顶部的 2 个三分点处预埋吊环，便于现场起吊和放置。最后，在扩展基础上部配置双向抗裂钢筋，防止起吊时扩展基础坡面混凝土受拉开裂。基础剖面见图 3。

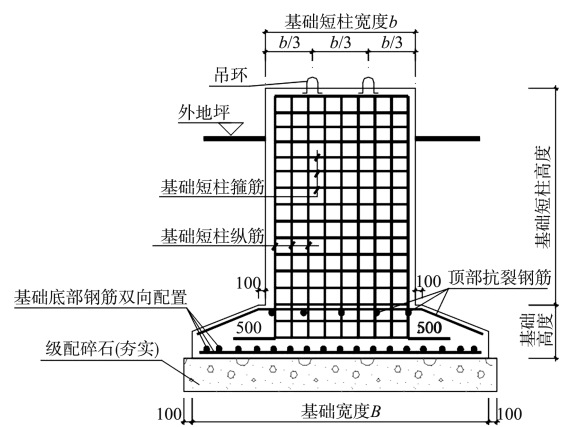


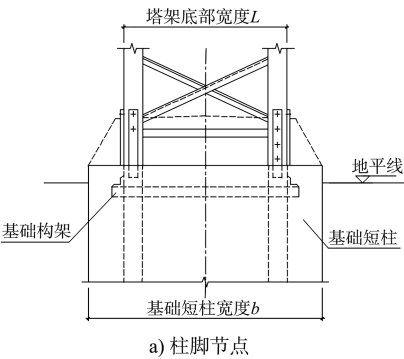
图 3 预制混凝土基础剖面 (单位: mm)

考虑到塔架的整体质量以及柱脚弯矩较大, 为保证柱脚的抗压、抗拉及抗弯性能, 必须提高角钢格构柱在柱脚部位的整体受力和协同工作的能力。因此, 角钢柱脚在锚入短柱的范围内采用基础构架加强其锚固作用。

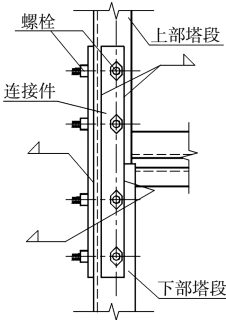
3.2 柱脚节点及塔段间连接节点

为了便于工厂对塔架的预制与运输, 需要将塔架分为多个塔段, 中间塔段长度为 6~7 m, 两端塔段为 3~4 m, 在现场进行组装, 加快现场施工进度。

预制混凝土基础内预先埋入角钢构架, 分布在角部的 4 个角钢伸出基础短柱顶面。为了连接基础预埋角钢和柱脚角钢, 在每侧翼缘分别预留 2 个螺栓孔; 对于每侧翼缘, 使用预留 4 个螺栓孔的连接板件, 其中 2 个孔与柱脚连接, 另外 2 个孔与基础预埋件连接, 并将连接板件与上下角钢分别焊接。塔段间的节点连接, 均采用连接板件与上下塔段进行栓焊连接的方式。连接节点见图 4。



a) 柱脚节点



b) 塔段间节点

图 4 连接节点

3.3 施工安装过程

各塔段的弦杆、腹杆和其他组件在工厂中已完成螺栓和焊接连接, 且混凝土基础可以在工厂预制。因此只需在现场进行基坑开挖, 构件吊装和安装等工作。具体安装过程见图 5。

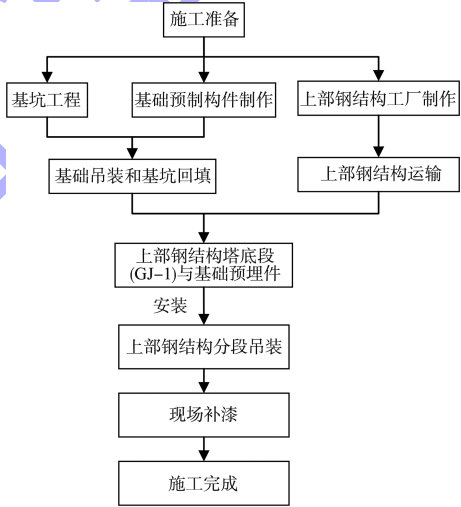


图 5 塔架施工安装过程

施工准备完成后, 基坑工程、基础预制构件以及上部钢结构的制作同步进行。基坑开挖完成后, 进行基础吊装和基坑回填, 同时运输制作好的上部钢结构构件, 最后进行现场塔架安装。

首先, 将上部钢结构的塔底段 (GJ-1) 与基础预埋件连接, 放置好预制混凝土基础; 然后, 将最下段的塔架平放在地上, 将柱脚节点其中一侧的螺栓连接好后, 用吊车把塔架绕着已连接的螺栓旋转 90°; 最后, 连接柱脚另一侧的螺栓, 螺栓全部连接完成后焊接。

柱脚节点连接完成后, 使用缆风绳稳定各塔段顶部, 将上部钢结构各塔段依次进行吊起、对接和安装。在螺栓连接完成后, 进行现场焊接并去角打

磨, 并对各安装节点现场补漆, 最终完成施工。

4 结论

- 1) 塔架采用角钢截面 (TJ01) 比采用钢管截面 (TJ02) 节省用钢量约 18.7%, 说明在其它条件都一致的情况下, 采用角钢截面更经济。
- 2) 塔架底部尺寸相同的情况下, 塔顶尺寸为塔底尺寸一半的结构 (TJ03), 相比塔顶塔底尺寸相同的结构 (TJ01), 节省用钢量约 10.0%, 说明在其它条件一致的情况下, 相比于上下同宽立面布置, 采用上窄下宽立面布置更经济。
- 3) 预制混凝土基础和上部塔架分段制作方法有利于工厂作业, 减少现场工作量。
- 4) 本工程采用全装配式钢结构形式, 提出主要装配式节点做法和施工安装方法, 施工工期缩短; 且便于塔架拆除, 处理成本降低, 促进建筑材料回收再利用, 符合新时代建筑绿色环保的理念。

参考文献:

[1] 崔璐. 预制装配式钢结构建筑经济性研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2015.

(上接第 165 页)

通过比选, 现浇混凝土铺面具有整体性好、耐久性高、使用年限长且造价相对较低的优势, 箱角间区铺面推荐采用现浇混凝土简易铺面, 同时采取缩小切缝间距、布设钢丝网或掺加钢纤维等措施, 防止铺面开裂。

3 结语

- 1) 重箱堆场常用的铺面结构形式为连片式联锁块铺面结构或箱角基础+箱角间区铺面结构, 而自动化集装箱码头对箱角基础的整体稳定以及差异沉降提出了更高的要求, 建议采用箱角基础+箱角间区铺面结构。
- 2) 箱角基础根据地基状况可采用天然地基、复合地基或桩基础, 须根据项目的工艺荷载条件、地质情况以及地基处理等对箱角基础进行多方案比选, 合理选择结构方案。
- 3) 为保证自动化装卸设备的正常作业, 轨道基

- [2] 林樱, 王元清, 丁大益, 等. 装配式钢结构建筑的工程应用与研究进展[C]//中国钢结构协会. 中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第 17 届 (ISSF—2021) 学术交流会暨教学研讨会. 西安: 中国钢结构协会, 2021: 235-239.
- [3] 郝际平, 孙晓岭, 薛强, 等. 绿色装配式钢结构建筑体系研究与应用[J]. 工程力学, 2017, 34(1): 1-13.
- [4] DAO T N, ASCE A M, JOHN W. Seismic performance of an innovative light-gauge cold-formed steel mid-rise building[C]// Structures Congress, Chicago: [s. n], 2012: 1496-1506.
- [5] REYNAUD S. Seismic design strength of cold-formed steel-framed shear walls[J]. Journal of structural engineering, 2010, 136(9): 1123-1130.
- [6] 单蕾. 风力机塔架结构选型与受力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [7] 同济大学. 高耸结构设计标准: GB 50135—2019[S]. 北京: 中国计划出版社出版, 2019.
- [8] 中国建筑科学研究院有限公司. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [9] 中国建筑科学研究院有限公司. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2018. (本文编辑 王传瑜)

础的工后沉降量应与箱角基础工后沉降相协调, 建议箱角基础二次处理方案与 ARMG 轨道基础方案一致。

参考文献:

- [1] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 中国港口协会. 自动化集装箱码头设计规范: JTS/T 174—2019 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- [2] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 钦州港大榄坪南作业区 9[#]、10[#]泊位工程施工图设计[R]. 广州: 中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 2020.
- [3] 陈刚, 朱洪涛, 陈思周. 全自动化集装箱堆场及道路铺面结构设计[J]. 港工技术, 2018, 55(6): 23-25.
- [4] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司. 港口道路与堆场设计规范: JTS 168—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- [5] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司. 自动化集装箱码头建设指南: JTS/T 199—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021. (本文编辑 王璁)