集装箱堆场光伏与场桥一体化支承结构设计方案研究

康晓同，李影，任宏宇
（中交第一航务工程勘察设计院有限公司，天津　300220）

摘　要：为助力自动化集装箱码头绿色零碳发展，依托天津港某自动化堆场工程方案设计，针对传统堆场光伏布设与场桥作业空间冲突的工程难题，对光伏与场桥一体化排架支承结构开展系统研究。从结构布置、构件选型、耐久性防护 3 方面进行分析论证。结构布置采用横向“隔一布二”方式，兼顾温度变形控制与堆场作业效率；通过有限元计算对比混凝土柱、钢管混凝土柱、钢柱 3 种排架柱方案，确定混凝土柱为优选方案，其柱顶位移 16.7 mm，满足 A8 级起重机 H_c/1 380 的位移限值要求；提出海港高盐雾环境下混凝土与钢结构协同的耐久性防护体系。研究成果为集装箱码头光伏与场桥一体化支承结构设计、施工及运维提供了技术路径，可为港口行业绿色低碳转型与零碳码头建设提供参考。

关键词：光伏与场桥一体化；集装箱堆场；支承结构；排架结构；耐久性
中图分类号：U6；U653.7；U656.135　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**2095-7874(2026)11-0061-07
doi：10.7640/zggwjs202611010

Design scheme of supporting structure for photovoltaic-gantry crane integration in container yards

Kang Xiaotong, Li Ying, Ren Hongyu
(CCCC First Harbor Consultants Co., Ltd., Tianjin 300220, China)

Abstract: To promote the green and zero-carbon development of automated container terminals, systematic research on the bent supporting structure of the photovoltaic-gantry crane system was conducted based on the scheme design of an automated container yard project at Tianjin Port. To address the engineering problem of spatial conflict between photovoltaic layout and gantry crane operation in traditional yards, three aspects including structural layout, component selection, and durability protection were analyzed and demonstrated. The structural layout adopts a transverse "one separated with two arranged" mode, which balances temperature deformation control and yard operation efficiency. Three bent column schemes, namely concrete columns, concrete-filled steel tube columns, and steel columns, were compared through finite element calculation. The concrete column scheme was selected as the optimal scheme, with a column top displacement of 16.7 mm, which meets the displacement limit of H_c/1 380 for Class A8 cranes. A synergistic durability protection system for concrete and steel structures in high salt spray environment of seaports was established. The research results provide a technical path for the design, construction, operation, and maintenance of the supporting structure of the photovoltaic-gantry crane integrated system at container terminals, and can serve as a reference for the green and low-carbon transformation of the port industry and the construction of zero-carbon terminals.

Key words: photovoltaic-gantry crane integration; container yard; supporting structure; bent structure; durability

0　引言

随着全球气候变化和能源转型加速推进，港口作为能源消耗和碳排放的重要节点，绿色低碳发展已成为行业共识[1-2]。集装箱码头堆场面积大，

收稿日期：2026-06-06　　修回日期：2026-08-04
基金项目：天津市科技计划项目（25YFKFYS00410）；天津市交通运输科技项目（2025-63）
作者简介：康晓同（1989—　），男，河北张家口人，硕士，高级工程师，主要从事港口工程土建结构设计及研究工作。E-mail：kangxiaotong@ccccltd.cn

是分布式光伏发电的理想应用场景。近年来，国内外多个港口开始探索堆场光伏应用，但传统的堆场光伏多利用仓库屋顶分布式光伏发电方式[3]，存在利用面积较小、发电量有限等问题；若直接占用堆场，又存在影响集装箱作业效率和浪费堆场面积等问题。

自动化集装箱码头采用自动化轨道吊(ARMG)进行集装箱装卸作业，具有作业效率高、人力成本低等优势[4]，自动化堆场的场桥轨道通常布置在堆场两侧，轨距大(通常 30~40 m)、轨顶高(通常 25~30 m)，为光伏组件的布设提供了天然的上部空间。将光伏组件与场桥支承结构相结合，形成光伏与场桥一体化支承结构，可实现“一场两用”，既不影响堆场作业，又能充分利用上部空间进行光伏发电，是港口绿色发展的创新模式。

与常见的以光伏为屋顶的大型厂房结构相比，光伏与场桥一体化支承结构具有显著差异：

1）功能复合性差异：普通厂房以生产空间为核心，光伏发电仅为屋面附加功能；本结构需同时满足场桥作业(重级工作制吊车、大跨度、高净空)和光伏发电(最大化屋面面积)两大核心功能。

2）荷载特征差异：普通厂房屋面荷载以恒载、风荷载、雪荷载为主，吊车荷载通常为低中级工作制；本结构承受 A8 级重级工作制场桥动荷载(起重载荷 410 kN、轨顶高 27 m)，吊车水平制动力为控制荷载。

3）布置约束差异：普通厂房温度缝可采用双柱方案；本结构柱位受箱角梁间距严格约束，每增加一排柱均会直接减少集装箱堆存量。

4）环境特殊性：本结构位于海港高盐雾环境，耐久性防护要求远高于普通内陆厂房。

本文依托天津港某自动化集装箱堆场工程，针对上述关键问题，从结构布置、排架柱选型、耐久性防护 3 个方面开展研究，为光伏与场桥一体化支承结构的工程应用提供技术支撑。

1 工程概况与设计条件

1.1 工程概况

天津港某自动化集装箱码头工程建设规模为 4 个集装箱泊位，码头岸线总长约为 1 450 m，可同时停靠 1 个 20 万吨级和 3 个 7 万吨级集装箱船，或者同时停靠 3 艘 20 万吨级集装箱船，设计年通过能力 360 万 TEU。

光伏与场桥一体化协同模式的堆场方案为布置 28 条自动化集装箱堆场，堆场面积 51.5 万 m^2，堆场内重箱和空箱混合堆放，冷藏箱分 8 块相对集中堆放(见图 1)，每条堆场配备 2 台自动化行车，轨距 38 m，轨顶高度 27 m，吊具下起重载荷 410 kN(工作级别 A8)，自动化行车由吊车梁和立柱支承运行，上部设屋面顶棚，满铺光伏板(见图 2)。

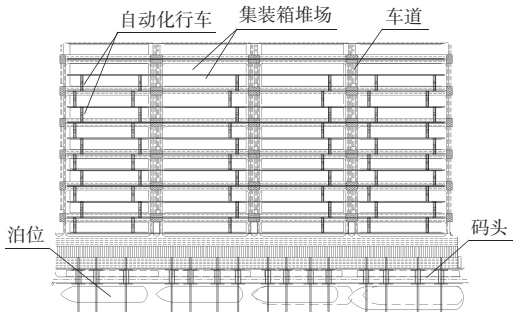


图 1 光伏与场桥一体化堆场平面布置图

Fig. 1 Layout plan of photovoltaic-gantry crane integration yard

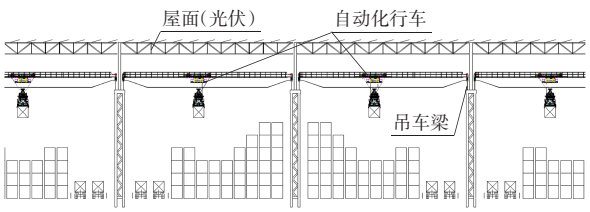


图 2 光伏与场桥一体化堆场局部剖面图

Fig. 2 Partial sectional view of photovoltaic-gantry crane integration yard

1.2 设计条件

1）结构设计使用年限为 50 a；结构安全等级为二级；地基基础设计等级为乙级。

2）荷载条件

①恒载：屋面恒载 0.5 kN/m^2(含檩条、光伏组件等)，其中光伏组件自重 0.2 kN/m^2。

②活载：屋面活载为 0.5 kN/m^2，基本雪压为 0.35 kN/m^2(重现期 R=50)。

③风荷载：基本风压 0.55 kN/m^2(R=50)，地面粗糙度 A 类。

④地震作用：抗震设防烈度 8 度，设计基本地震加速度 0.20g，设计地震分组第二组，场地类别 IV 类。

⑤吊车荷载：A8 级重级工作制，额定起重荷载 410 kN，小车自重荷载 150 kN，最大轮压 380 kN。

3）材料条件

①混凝土：排架柱和基础均采用 C40 混凝土，PHC 管桩采用 C80 混凝土。

②钢材：钢结构构件采用 Q355B 钢。

③钢筋：采用 HRB400 级。

4）环境条件

工程位于天津港港区，属海港高盐雾环境，腐蚀等级按 GB/T 50046—2018《工业建筑防腐蚀设计标准》划为强腐蚀等级[5]。

5）工艺条件

场桥轨距 38 m，轨顶高度 27 m，箱角梁间距 6.458 m，每跨 9 个箱位。

1.3　地基基础方案

根据地质勘察报告，场地土层主要为淤泥质土、粉质黏土、粉土和粉细砂，考虑到上部荷载较大且对沉降要求严格，本工程采用 PHC 预应力混凝土管桩基础，桩径 800 mm，壁厚 130 mm，桩长 35 m，单桩竖向承载力特征值 R_a=2 000 kN。排架柱与桩基通过承台连接，每个承台布置 4 根 PHC 管桩，呈正方形布置，桩间距 3.2 m。

2　结构布置方案

2.1　排架支承结构的构件组成

结构由排架柱系统、吊车梁系统和屋面系统组成（见图 3）。

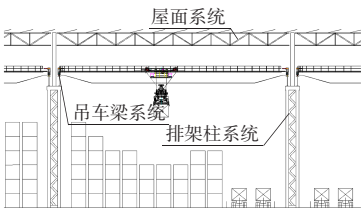


图 3　支承结构的构件组成

Fig. 3　Composition of supporting structural components

1）排架柱系统

排架柱系统主要由排架柱和柱间支撑组成。排架柱作为竖向构件支承整个屋面及吊车重量，柱间支撑作为抗侧力构件承受吊车水平力及地震作用。

2）吊车梁系统

吊车梁系统主要由吊车梁和制动桁架组成。吊车梁保障自动化行车在其纵向运行，制动桁架是吊车梁系统的关键水平受力与稳定构件，用于承受吊车横向水平制动力、保证吊车梁侧向稳定、增强整体刚度并提供检修通道。

3）屋面系统

屋面系统由钢桁架梁、檩条和光伏板组成。钢桁架梁两端刚接于排架柱，是屋面系统的主要受力构件，承受风、雪以及光伏板等荷载，檩条相当于次梁，光伏矩阵满铺于檩条之上，最大限度地利用堆场面积发电。

2.2　支承结构的布置方案

1）横向布置方案

支承结构横向为自动化行车跨度方向（即一条堆场带的宽度方向），其布局与行车跨度、温度区段等因素有关。本工程自动化行车跨度为 38 m，屋面钢桁架梁跨度为 39.7 m，根据 GB 50017—2017《钢结构设计标准》第 3.3.5 条，柱顶刚接时，横向最大温度区段为 100 m，即每 100 m 需要设置一个独立的结构段来避免由于温度作用带来的影响[6]。

对于普通厂房，一般的处理方式是设置双柱，柱间设变形缝，使其成为独立的结构段。本工程为集装箱堆场，每 100 m 均采取双柱会大大增加支承结构的占地面积，从而直接影响集装箱堆存量和作业效率，也会额外增加结构造价。

为避免设置双柱，提出“隔一布二”的布置方式（见图 4），即每布置 2 组连续钢桁架梁后，间隔布置 1 组无梁排架柱，使其无法形成一个完整的温度单元，这样既有效解决了横向温度作用的问题，同时节约占地，提高作业效率。

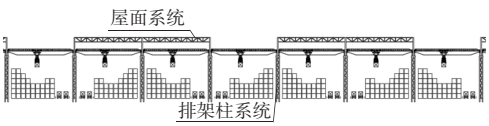


图 4　支承结构横向布置图

Fig. 4　Supporting structure transverse layout

本工程共 28 条堆场带（51.5 万 m^2），按此横向布置方式，其中 19 条堆场带（34.2 万 m^2）可铺设屋面光伏，经测算，所产生电能可满足本工程“零碳”要求。

2）纵向布置方案

支承结构纵向为自动化行车运行方向（即一条堆场带的长度方向），温度区段长度、吊车梁跨度和箱角梁尺寸会对其布置方式造成影响。

《钢结构设计标准》第 3.3.5 条规定纵向最大温度区段为 120 m，由于集装箱装卸不会跨越单条堆场，排架柱纵向不会对集装箱装卸和堆存容量造成影响，故可按 120 m 设置独立温度区段，区段间设置双柱[6]。

温度区段内的柱距需综合考虑吊车梁跨度和箱角梁尺寸。吊车梁通常不超过 15 m，本工程吊具下起重载荷 410 kN，工作级别为 A8，属于重级工作制，经计算，吊车梁在 12 m 左右可以满足要求且经济性较好；为协调箱角梁与排架柱平面位

置，避免基础干涉，排架柱宜布置在箱角梁间，每个箱角梁间距为 6.458 m，2 个箱角梁间距为 12.916 m，基本符合吊车梁的经济跨度。综合考虑，将 12.916 m 作为纵向柱间距，每个结构段为 116.244 m≤120 m，也可满足温度区段长度要求，如图 5 所示。

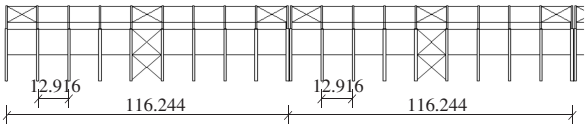


图 5 支承结构纵向布置图(m)

Fig. 5 Supporting structure longitudinal layout(m)

3 排架柱选型与有限元分析

3.1 有限元模型建立

在支承结构中，排架柱作为主要承重部件，承受光伏屋面恒载、风荷载、雪荷载及自动化行车竖向、水平荷载等作用；海港高盐雾环境对构件防腐性能与长期耐久性也提出较高要求；同时受堆场规模影响，排架柱造价也是需要重点考量的经济指标。

建立整体模型(见图 6)，并取 1 组横向支承结构为单元分析，通过 midas 有限元计算，对 3 种排架柱方案进行对比分析。

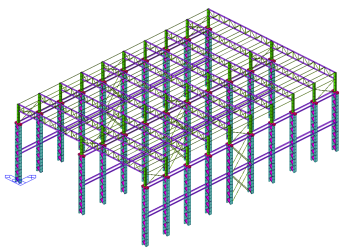


图 6 支承结构有限元模型简图

Fig. 6 Supporting structure FEM sketch

1）单元类型：混凝土柱采用梁单元，钢管混凝土柱采用组合截面梁单元(考虑钢管与混凝土的共同工作)，钢柱及其他钢构件均采用梁单元。

2）边界条件：柱底采用固定端约束；屋面桁架上下弦与柱顶铰接；吊车梁与柱牛腿铰接，仅传递竖向力和水平力。

3）主要基本组合：1.3×恒载+1.5×活载；1.3×恒载+1.5×风载；1.3×恒载+1.5×活载+0.9×风载；1.3×恒载+1.05×活载+1.5×风载；1.2×恒载+0.6×活载+1.3×水平地震作用+0.5×竖向地震作用；1.3×恒载+1.05×活载+1.5×吊车荷载；1.3×恒载+1.05×活载+0.9×风载+1.5×吊车荷载；1.3×恒载+1.05×活载+1.5×风载+1.05×吊车荷载；1.2×恒载+0.6×活载+0.6×吊车荷载+1.3×水平地震作用+0.5×竖向地震作用等。

3.2 控制工况与位移限值

根据 GB 50906—2013《机械工业厂房结构设计规范》第 9.1.11 的规定，重级工作制(A8 级)起重机下，柱顶横向位移限值 $\Delta_{max}=H_c/1\ 380$[7](H_c 为基础顶面到起重梁(桁架)顶面的高度，mm)。吊车水平制动力作用下的柱顶位移是排架柱选型的控制工况。本工程轨顶高度 27 m，即柱顶(吊车梁顶)高度约 27 m，因此柱顶横向位移限值为 19.6 mm。

下面分别对混凝土排架柱、钢管混凝土排架柱、钢排架柱 3 种方案进行计算分析。

3.3 3 种排架柱方案计算

3.3.1 混凝土排架柱

混凝土排架柱为双肢柱，下柱由柱肢和斜腹杆组成(均为矩形截面)，并在自动化行车处设置肩梁，上柱为单肢柱，承受屋面桁架。混凝土排架柱各构件截面分别为：下柱柱肢 1 200 mm×400 mm(矩形高度×矩形宽度)，斜腹杆 1 000 mm×300 mm(矩形高度×矩形宽度)，肩梁 1 100 mm×800 mm，上柱 800 mm×800 mm。模型简图如图 7 所示。

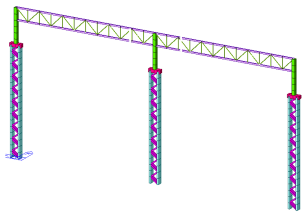


图 7 混凝土排架柱模型简图

Fig. 7 Concrete bent column model sketch

有限元计算结果表明，在吊车水平制动力作用下，柱顶横向位移 16.7 mm(见图 8)，小于限值 19.6 mm，满足规范要求。柱底最大弯矩 3 250 kN·m，最大剪力为 240 kN，配筋计算满足承载力要求。

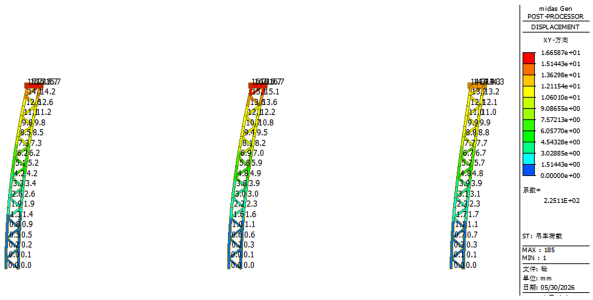


图 8 混凝土排架下柱柱顶的横向位移

Fig. 8 Lateral displacement at top of concrete bent lower column

3.3.2　钢管混凝土排架柱

钢管混凝土排架柱为双肢柱，下柱由钢圆管+核心混凝土和钢管斜撑组成，并在自动化行车处设置焊接 H 型钢肩梁，上柱为焊接 H 型钢柱，承受屋面桁架。各构件截面分别为：下柱柱肢 ϕ530 mm×16 mm（外径×壁厚），斜腹杆 ϕ203 mm×10 mm（外径×壁厚），肩梁和上柱 WH650 mm×350 mm×18 mm×20 mm（高度×宽度×腹板厚度×翼缘板厚度）。模型简图如图 9 所示。

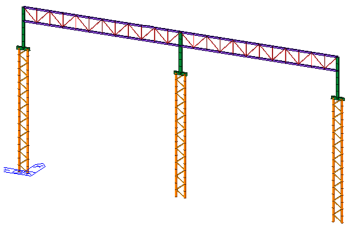


图 9　钢管混凝土排架柱模型简图

Fig. 9　Concrete–filled steel tube bent column model sketch

有限元计算结果表明，在吊车水平制动力作用下，柱顶横向位移为 18.5 mm（见图 10），小于限值 19.6 mm，满足规范要求。柱底最大轴压力为 3 600 kN，最大弯矩为 2 980 kN·m，钢管混凝土组合承载力满足要求。

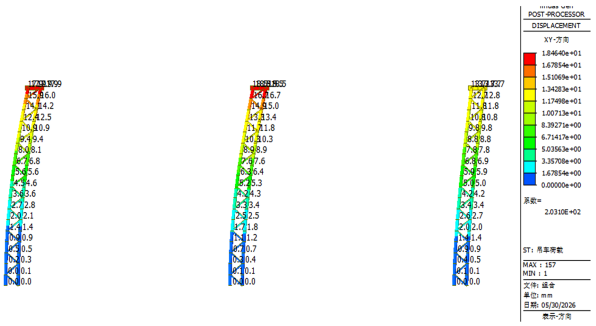


图 10　钢管混凝土排架下柱柱顶的横向位移

Fig. 10　Lateral displacement at top of lower column of concrete–filled steel tube bent frame

3.3.3　钢排架柱

钢排架柱为双肢桁架柱，下柱由焊接 H 型钢和角钢斜撑组成，并在自动化行车处设置焊接 H 型钢肩梁，上柱为焊接 H 型钢柱，承受屋面桁架。各构件截面分别为：下柱柱肢 WH800 mm×100 mm×22 mm×25 mm（高度×宽度×腹板厚度×翼缘板厚度），斜腹杆 125 mm×10 mm（边宽度×边厚度），肩梁和上柱 WH650 mm×350 mm×18 mm×20 mm（高度×宽度×腹板厚度×翼缘板厚度）。模型简图如图 11 所示。

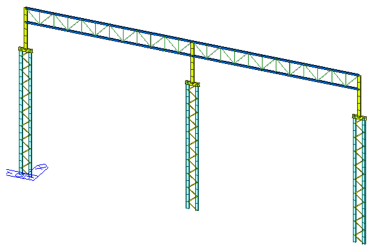


图 11　钢排架柱模型简图

Fig. 11　Steel bent column model sketch

有限元计算结果表明，在吊车水平制动力作用下，柱顶横向位移为 19.6 mm（见图 12），处于规范限值（19.6 mm）的边缘，安全储备较小。柱底最大弯矩为 2 850 kN·m，最大剪力为 220 kN，强度和稳定性验算满足要求。

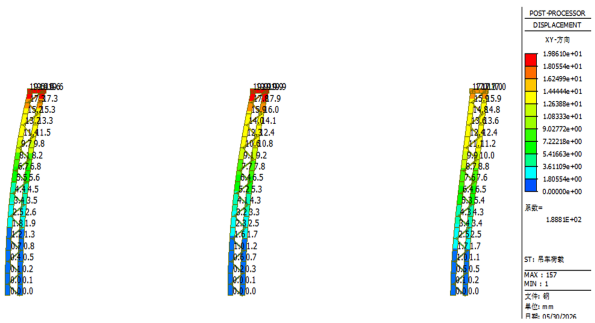


图 12　钢排架下柱柱顶的横向位移

Fig. 12　Lateral displacement at top of steel bent lower column

3.4　方案对比

3.4.1　位移对比

3 种方案在不同荷载工况下的柱顶横向位移计算结果见表 1。

表 1　3 种方案柱顶横向位移对比

Table 1　Comparison of lateral displacements at column tops for three schemes

mm

荷载工况	混凝土柱	钢管混凝土柱	钢柱
吊车水平荷载	16.7	18.5	19.6
风荷载	8.2	9.5	11.8
地震作用（多遇）	30.6	40.2	78.9

从表 1 可以看出：

1）3 种方案在吊车水平荷载作用下的位移均满足规范要求，其中混凝土柱方案位移最小，安全储备最大；钢柱方案位移等于限值，安全储备较小。

2）风荷载作用下，3 种方案的位移均远小于《钢结构设计标准》中风荷载限值 H_c/400=67.5 mm[6]。

3）多遇地震作用下，依据 GB 50011—2010《建筑抗震设计规范》[8]，混凝土柱和钢管混凝土柱方案的位移小于地震限值 H_e/550=49.1 mm，钢柱方案的位移远小于地震限值 H_e/250=108 mm，也进一步验证了吊车荷载为控制工况。

4）混凝土柱的刚度最大，钢管混凝土柱次之，钢柱刚度最小。

3.4.2 耐久性对比

海港高盐雾环境下，结构耐久性是重要的考量因素。混凝土结构腐蚀速率慢，防护易实施，且维护成本低，其耐久性能显著，全周期仅需定期修补表面涂层，无需大规模更换构件，使用寿命可达 50 a 以上。

钢结构易受腐蚀，常规防腐体系下，钢结构防腐涂层的设计使用年限为 15 a，需定期进行涂层检测和维护翻新；在采取加强级防腐措施（如增加涂层厚度、采用耐候钢等）的情况下，涂层使用寿命可延长至 25 a[9]。钢管混凝土柱由于钢管内部有混凝土填充，内表面不会发生腐蚀，耐久性优于纯钢柱，但外表面仍需进行防腐处理。

3.4.3 经济性对比

在 3 种方案模型计算的基础上，通过对主要构件工程量的统计，核算出 3 种方案的单价如表 2 所示。

表 2 支承结构单价表

Table 2 Unit price list of supporting structures

元/m²

混凝土柱方案	钢管混凝土柱方案	钢柱方案
2 649.8	2 980.2	3 204.6

可以看到，混凝土柱方案单价最低，较钢管混凝土柱方案低 11.1%，较钢柱方案低 18.5%。考虑到全生命周期成本，混凝土柱方案的维护成本也最低，经济性优势更为明显。

3.4.4 方案比选结果

综合考虑位移控制、耐久性、经济性等因素，预制混凝土排架柱方案刚度大、位移小、耐久性好、造价低，是本工程的推荐方案。

4 耐久性防护体系

4.1 防护体系的构成

天津港处于海港高盐雾环境，氯离子侵蚀是影响结构耐久性的主要因素[10]，材料劣化速率快、性能衰减显著，导致结构服役寿命缩短，直接威胁工业建筑的安全与可靠运行。本工程支承结构为混凝土柱+钢屋架的混合结构体系，针对混凝土结构和钢结构分别采取相应的防护措施，构建“分层次防护+全周期维护”的耐久性防护体系。

本防护体系的措施依据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》和《工业建筑防腐蚀设计标准》的相关规定[5,11]，其创新性在于针对光伏与场桥一体化支承结构的特点，将混凝土结构防护与钢结构防护进行系统集成，并结合本工程条件对涂层体系进行了优化配置。

4.2 混凝土结构耐久性设计与防护

1）材料与配合比控制

强腐蚀环境下，混凝土最低强度等级为 C40，最大水胶比为 0.40，最小胶凝材料用量为 340 kg/m³，胶凝材料的氯离子含量≤0.08%，最大碱含量为 3.0 kg/m³，抗渗等级≥P8[11]。水泥优先选用普通硅酸盐水泥，硫酸盐强腐蚀工况采用高抗硫酸盐硅酸盐水泥，并严禁使用含氯外加剂，需掺入钢筋阻锈剂与抗硫酸盐外加剂，提升混凝土密实度与钢筋抗锈蚀能力。

2）裂缝与保护层控制

强腐蚀环境下钢筋混凝土裂缝控制等级为二级，最大裂缝宽度≤0.15 mm。混凝土保护层厚度需严格控制，要求支承柱≥40 mm，基础及地下部分≥50 mm，方能有效阻隔介质侵蚀钢筋。

3）结构表面防护

若有更高的防腐蚀要求，支承柱可采用 11~15 a 使用年限涂层体系，总厚度≥200 μm。混凝土基层需打磨平整、清除浮浆油污，要求附着力≥1.5 MPa，配套涂层体系为环氧封闭底漆（2 遍，60 μm）+环氧玻璃鳞片中涂（1 遍，≥80 μm）+耐酸碱面漆（2 遍，≥60 μm）[5]。

外露预埋件可采用树脂或聚合物水泥的混凝土或砂浆包裹、抹面，也可采用玻璃鳞片胶泥或防腐涂层防护。

4.3 钢结构耐久性设计与防护

1）截面与材质

钢材选用 Q355B 及以上等级，严禁 D 级锈蚀钢材，优先采用实腹式、闭口截面、H 型钢或圆管，设计有更高要求时可采用耐候钢材；钢板厚度≥6 mm、闭口截面≥4 mm、角钢≥5 mm，保障结构刚度与抗腐蚀能力。

2）焊缝与连接

主要构件采用连续满焊，焊脚尺寸≥8 mm；

加劲肋切角≥50 mm，便于排水与防腐施工；高强螺栓接触面除锈等级为 Sa2.5，缝隙嵌耐腐蚀密封膏；异种金属接触处设置隔离垫，规避电化学腐蚀。

3）表面防腐涂层

钢结构采用超长使用年限(>15 a)的涂层体系，总厚度≥320 μm。除锈等级 Sa2.5，配套涂层体系为环氧富锌底漆(2 遍，70 μm)+环氧云铁中涂(2 遍，110 μm)+丙烯酸聚氨酯面漆(3 遍，140 μm)，室外及潮湿环境涂层厚度增加 20~40 μm[5]。

4.4　全周期维护管理

1）建立季度外观检查、年度性能检测机制，重点排查涂层破损、节点腐蚀及保护层厚度。

2）日常及时清理表面积尘与腐蚀介质，破损处 24 h 内修补。

3）设定大修周期：防腐涂层 12~15 a 翻新，混凝土面层 15 a 大修，钢结构 15 a 全面检测，保障支承结构长期耐久。

5　结语

本文针对集装箱堆场光伏与场桥一体化排架支承结构开展系统研究，得出以下主要结论：

1）光伏与场桥一体化模式可实现光伏布设与堆场装卸一体化运行，是实现港口绿色零碳建设的有效路径。

2）支承结构横向采用“隔一布二”、纵向间距适配箱角梁尺寸，既满足温度变形控制要求，又最大限度地减少了对堆场作业效率的影响。

3）通过有限元计算对比了混凝土柱、钢管混凝土柱、钢柱 3 种排架柱方案，结果表明 3 种方案在吊车荷载作用下的位移均满足规范要求，其中混凝土柱方案位移最小(16.7 mm)、耐久性最好、造价最低，推荐为优选方案。风荷载和地震作用下位移均较远小于限值，吊车荷载为控制工况。

4）将混凝土结构防护与钢结构防护进行系统集成，构建了海港高盐雾环境下混凝土与钢结构协同的耐久性防护体系，采用分层次防护策略和全周期维护管理，确保结构在设计使用年限内的安全耐久。

本研究为集装箱堆场中光伏布设与场桥作业协同应用的核心技术难题提供了解决思路，研究成果可为集装箱码头光伏与场桥一体化支承结构的设计、施工及运维提供技术参考，对推动港口行业绿色低碳转型和零碳码头建设具有积极意义。

参考文献：

[1] 王轩，张晋恺. 新一代智能集装箱码头绿色零碳设计探讨[J]. 港工技术，2022，59(4)：94-96，111.
Wang X, Zhang J K. Discussion on green design of new-generation intelligent container terminal with zero-carbon emission[J]. Port Engineering Technology, 2022, 59(4): 94-96, 111.

[2] 张伟. 绿色生态港口建设分析[J]. 中国水运，2024(15)：70-72.
Zhang W. Analysis on construction of green ecological ports[J]. China Water Transport, 2024(15): 70-72.

[3] 史媛. 屋顶分布式光伏发电的支架结构设计探究[J]. 电气技术与经济，2022(4)：36-38.
Shi Y. Research on bracket structure design of rooftop distributed photovoltaic power generation[J]. Electrical Equipment and Economy, 2022(4): 36-38.

[4] 何继红. 自动化集装箱码头装卸工艺系统应用现状与展望[J]. 水运工程，2018(6)：199-203.
He J H. Application and development trend of handling process system in automated container terminal [J]. Port & Waterway Engineering, 2018(6): 199-203.

[5] GB/T 50046—2018 工业建筑防腐蚀设计标准[S].
GB/T 50046—2018 Standard for anticorrosion design of industrial constructions[S].

[6] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S].

[7] GB 50906—2013 机械工业厂房结构设计规范[S].
GB 50906—2013 Code for design of machinery industry workshop structures[S].

[8] GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2010 Code for seismic design of buildings[S].

[9] 狄志刚，王伟杰，官自超，等. 海洋装备防腐蚀涂层寿命预测方法的研究进展[J]. 腐蚀与防护，2026，47(3)：109-114.
Di Z G, Wang W J, Guan Z C, et al. Research progress on life prediction methods of anti-corrosion coatings for marine equipment[J]. Corrosion & Protection, 2026, 47(3): 109-114.

[10] 陈昊翔，孙涛，杨海成，等. 多海域混凝土结构的耐久性监测及其数据分析[J]. 腐蚀与防护，2023，44(8)：7-12.
Chen H X, Sun T, Yang H C, et al. Durability monitoring of concrete structures and monitoring data analysis in several sea areas[J]. Corrosion & Protection, 2023, 44(8): 7-12.

[11] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures[S].