

港口码头工程结构设计要点

钱俊先

云南水运规划设计研究院有限公司 云南 昆明 650051

摘要: 港口码头工程结构设计需兼顾功能性与耐久性。本文首先阐述重力式、高桩、板桩及混合结构码头特点与选型原则,分析基础与接岸设计要点,包括地基处理、岸坡保护及连接方式。随后探讨上部结构功能模块设计、耐久性提升策略及施工维护便利性。最后提出绿色材料应用、生态融合、智能化监测及全生命周期价值优化等创新设计理念,为港口码头工程结构与可持续发展提供参考。

关键词: 港口码头; 结构设计; 耐久性设计; 生态融合; 智能化监测

引言: 港口作为交通运输枢纽,在经济与社会发展中扮演关键角色。港口码头工程结构设计直接影响港口运营效率、安全性及可持续性。不同地质条件、荷载要求及使用场景下,码头结构类型多样,各有优劣。合理选型与设计对保障码头结构稳定、耐久至关重要。随着环保理念深入人心及科技发展,创新与可持续发展设计成为港口码头工程新方向

1 港口码头结构类型与选型原则

1.1 重力式码头

重力式码头以自身重量维持稳定,核心构件包含方块、沉箱、扶壁等。方块码头由预制方块逐层堆砌而成,每个方块尺寸较大,通过自身重力抵抗外力作用,适用于深水区作业。在深水环境中,水流和波浪作用力较强,方块码头凭借较大自重能有效平衡这些外力,保障码头结构稳定^[1]。沉箱码头则利用大型沉箱作为主要承重结构,沉箱在岸上预制后浮运至指定位置下沉就位。这种结构形式在软土地基上优势明显,软土地基承载力较低,沉箱自重可压实地基,提高地基承载力,满足高承载力需求。扶壁码头由扶壁、底板和胸墙组成,扶壁作为主要受力构件,将荷载传递至底板和地基。其结构稳定性强,能承受较大水平荷载和竖向荷载,但材料用量相对较大,建设成本较高。

1.2 高桩码头

高桩码头采用桩基、纵梁、横梁、面板的分层设计。桩基深入地基,将上部结构荷载传递至深层土体或岩层,桩基入土深度一般根据地质条件在10-30米。纵梁和横梁构成框架结构,支撑面板,面板直接承受货物和人员荷载。这种结构适用于浅水区,浅水区水深较浅,一般水深在3-10米,高桩码头桩基长度相对较短,施工难度降低。在中等地基条件下,高桩码头轻量化设计能较好适应地基变形。当地基存在一定不均匀沉降时,高桩码头

桩基可随地基变形产生一定挠度,挠度一般控制在10-30毫米以内,避免结构因应力集中而破坏。不过,高桩码头抗侧力较弱,在水平荷载如波浪力、船舶撞击力作用下,需采取额外措施增强结构稳定性,如设置斜撑或增加桩基数量,斜撑数量根据码头规模和受力情况一般在2-6根。

1.3 板桩码头

板桩码头依靠板桩墙、锚碇结构、拉杆协同受力。板桩墙直接承受土压力和水压力,锚碇结构通过拉杆将板桩墙所受拉力传递至后方稳定土体。这种结构形式适用于墙高较小、对施工便捷性要求较高的场景。墙高较小时,一般墙高在5-12米,板桩墙所受土压力和水压力相对较小,结构受力较为合理。施工便捷性方面,板桩码头可采用打入法或振冲法施工板桩,施工速度快,打入法每天可施工板桩数量约为20-50根,对周边环境影响小。由于板桩码头以侧向受力为主,需强化抗弯与抗拔能力。可通过增加板桩厚度、选用高强度材料或优化锚碇结构形式等方式提高结构抗弯与抗拔性能,板桩厚度一般增加5-10毫米。

1.4 混合结构码头

混合结构码头采用重力式与高桩、板桩与高桩等复合设计。在复杂地质或荷载条件下,单一结构形式难以满足工程要求,混合结构码头应运而生。例如,当地基部分区域为软土,部分区域为岩石时,可采用重力式与高桩混合结构。在软土区域采用高桩结构,利用桩基将荷载传递至深层稳定土体,软土区域桩基入土深度一般为15-25米;在岩石区域采用重力式结构,依靠自身重量维持稳定,重力式结构自重一般每平方米达到10-20吨。这种组合形式融合多结构优势,提升整体适应性与经济性。不同结构形式相互补充,既能有效应对复杂地质条件,又能根据各部分受力特点优化结构设计,降低建设成本。

2 港口码头基础与接岸设计要点

2.1 基础设计核心要素

地基处理是基础设计关键环节。换填法适用于浅层软弱地基,将软弱土层挖除,换填强度较高、压缩性较低的材料,如砂石、碎石等,换填深度一般在1-3米,提高地基承载力。强夯法通过重锤自由落体冲击地基,使地基土体密实,增强地基强度和稳定性,重锤质量一般为8-12吨,落距一般为10-20米,适用于处理碎石土、砂土等地基^[2]。桩基适用于深层软弱地基或承载力要求较高的情况,通过桩身将荷载传递至深层土体或岩层,桩基直径一般为0.8-1.5米。沉井则是一种在地面制作井筒,下沉至设计标高后封底的结构形式,常用于地下水位较高、地质条件复杂的情况,沉井直径一般为5-15米。基础形式选择需综合考虑地质条件,扩展基础适用于地基承载力较好、变形较小的区域,地基承载力一般大于150千帕;桩基础适用于深层软弱地基;复合基础则结合多种基础形式优点,适应复杂地质条件。抗浮与抗沉是基础设计重要目标,通过合理设计结构自重平衡浮力,对软弱地基进行加固处理提高地基承载力,或采用结构补偿措施,如设置抗浮桩等,实现基础稳定性,抗浮桩数量根据码头规模和浮力情况一般在10-50根。

2.2 接岸结构设计关键

岸坡保护对维护码头稳定和生态环境至关重要。块石护坡通过铺设块石阻挡水流和波浪冲刷,保护岸坡土体不被侵蚀,适用于水流和波浪作用较强区域,块石粒径一般在20-50厘米。混凝土护坡强度高、耐久性好,能有效抵御水流和波浪侵蚀,但生态适应性相对较差,混凝土强度等级一般采用C30-C40。植被护坡利用植物根系固土作用,减少岸坡土体流失,同时美化环境,适用于水流和波浪作用较弱、对生态环境要求较高区域。挡土墙类型选择依据地形、地质和荷载条件确定。重力式挡土墙依靠自身重量抵抗土压力,适用于墙高较低、地基承载力较好情况。悬臂式挡土墙由立壁和底板组成,利用底板上部土体重力平衡土压力,适用于墙高较高、地基承载力有限情况。扶壁式挡土墙在悬臂式挡土墙基础上增加扶壁,增强结构整体稳定性,适用于墙高较大、荷载较大情况。变形协调通过柔性连接或过渡段设计实现,柔性连接允许码头与岸坡产生一定相对位移,减少差异沉降对结构影响;过渡段设计则通过设置渐变结构,使码头与岸坡刚度逐渐过渡,降低应力集中。

2.3 基础与上部结构连接

刚性连接能传递弯矩与剪力,适用于重力式码头。重力式码头基础与上部结构通过钢筋混凝土整体浇筑或

刚性节点连接,使基础与上部结构形成一个整体,共同承受荷载。这种连接方式能有效传递荷载,保证结构整体稳定性,但对基础与上部结构变形协调要求较高,变形协调误差一般控制在5-10毫米以内。柔性连接适应变形能力强,减少应力集中,常见于高桩码头。高桩码头基础与上部结构通过弹性支座或柔性节点连接,允许上部结构在一定范围内自由变形,适应地基不均匀沉降和温度变化引起的变形,变形范围一般在10-30毫米,避免结构因应力集中而破坏。

3 港口码头上部结构与耐久性设计

3.1 上部结构功能模块设计

码头面层直接承受货物和人员荷载,需选用耐磨、防滑、抗冲击材料^[3]。耐磨材料可减少货物运输过程中对面层磨损,延长面层使用寿命;防滑材料能增加人员行走安全性,防止滑倒事故发生;抗冲击材料可抵御货物装卸过程中冲击力,保护面层结构。同时,合理布局排水系统,及时排除面层积水,防止积水对结构造成侵蚀。纵梁与横梁跨度、截面尺寸及配筋构造需根据荷载大小、使用要求等因素确定。跨度过大,梁的挠度增大,影响结构正常使用;跨度过小,则增加材料用量和施工难度。截面尺寸设计需满足承载力和刚度要求,配筋构造要合理,保证梁在受力过程中钢筋与混凝土协同工作。靠船构件布置原则需考虑船舶靠泊方式和荷载特点。靠船墩、系船柱、护舷位置和数量应根据船舶吨位、靠泊频率等因素确定,确保船舶安全靠泊。同时,对靠船构件进行耐久性强化设计,采用高强度材料、增加防腐措施等,提高其使用寿命。

3.2 耐久性提升策略

材料选择对结构耐久性至关重要。高强度混凝土具有较高抗压强度和耐久性,能抵抗外界环境侵蚀,延长结构使用寿命,混凝土抗压强度一般达到50-80兆帕。耐腐蚀钢筋在钢筋表面采用特殊处理工艺,提高钢筋抗腐蚀能力,减少因钢筋锈蚀导致结构破坏,耐腐蚀钢筋使用寿命一般比普通钢筋延长5-10年。环保涂层不仅能保护结构表面,减少腐蚀介质侵蚀,还具有环保性能,降低对环境的影响,涂层厚度一般为50-100微米。防腐措施包括涂层保护、阴极保护及控制混凝土保护层厚度。涂层保护在结构表面涂刷防腐涂料,形成保护膜,阻止腐蚀介质与结构接触,防腐涂料涂刷遍数一般为2-3遍。阴极保护通过外加电流或牺牲阳极方法,使结构成为阴极,防止钢筋锈蚀,牺牲阳极数量根据结构规模和腐蚀情况一般在5-20块。混凝土保护层厚度控制能保证钢筋与外界环境隔离,减少钢筋锈蚀风险,混凝土保护层厚度一

一般为30-50毫米。裂缝控制通过优化构造钢筋配置和加强施工养护实现。合理设置构造钢筋能提高混凝土抗裂性能,构造钢筋间距一般为150-250毫米,施工养护过程中保持混凝土表面湿润,控制养护温度和湿度,减少早期开裂风险,养护时间一般不少于14天。

3.3 施工与维护便利性设计

模块化设计将上部结构划分为若干预制构件,在工厂预制后运输至现场安装。这种设计方式减少现场施工难度,提高施工效率,保证施工质量。同时,模块化构件便于更换和维修,降低后期维护成本。检修设施预留为码头长期维护提供便利。预留检修孔、爬梯及操作平台,方便维修人员对结构进行检查和维修。检修孔位置和尺寸应根据结构特点和维修要求确定,爬梯和操作平台要保证安全可靠,满足维修人员操作需求。

4 港口码头创新与可持续发展设计

4.1 绿色材料技术集成应用

再生材料利用聚焦非承重结构,再生混凝土通过骨料级配优化满足强度要求,再生骨料在道路基层与护坡工程中广泛应用^[4]。环保涂料研发注重环境友好性,水性涂料替代溶剂型涂料减少挥发性有机物排放,纳米材料改性提升涂层防护性能。绿色材料应用需建立全流程质量控制体系,从原料选择到施工工艺进行系统管控。材料性能验证通过模拟环境试验与长期监测相结合,确保结构耐久性不受影响。

4.2 生态融合设计创新实践

透水结构设计在高桩码头中实现生态效益最大化,桩间透空区域促进水流交换,维持水域自净能力。人工鱼礁设置在码头下部空间,采用仿生造型与环保材料构建生物栖息场所。生态护坡技术结合植被恢复与工程防护,在保持岸坡稳定的同时提升生物多样性。生态设计需与结构功能协调,避免因追求生态效益影响结构安全性。环境影响评估贯穿设计全过程,通过数值模拟预测生态修复效果。

4.3 智能化监测系统构建

传感器预留设计为结构健康监测提供硬件基础,应

变传感器、位移传感器与加速度计的布局覆盖关键受力部位。数据采集系统采用无线传输技术,实现实时监测与远程管理。监测数据通过云计算平台进行分析处理,建立结构性能退化预警模型。智能化设计需考虑系统可靠性与维护便利性,传感器防护等级满足海洋环境要求,电源供应采用太阳能与蓄电池组合方式。监测系统与结构维护管理联动,形成闭环控制体系。

4.4 全生命周期价值优化

可更换构件设计聚焦易损部位,护舷、系船柱等部件采用标准化接口,便于快速更换维修。构件设计考虑疲劳寿命与更换周期,预留足够的强度储备^[5]。经济性平衡通过结构优化实现,在满足功能要求前提下减少材料用量,采用高性能材料提升结构效率。全生命周期成本分析涵盖建设、使用与拆除阶段,通过价值工程方法评估设计方案的经济性。可持续性评价建立综合指标体系,包含环境影响、资源消耗与经济效益等多维度参数。

结束语

港口码头工程结构设计要点众多,涵盖结构选型、基础与接岸、上部结构及耐久性等方面。创新与可持续发展设计为码头建设带来新方向,绿色材料、生态融合、智能化监测及全生命周期价值优化等理念的应用,提升码头性能与效益。在实际工程中,需综合考虑多方面因素,科学合理设计,确保港口码头安全、高效、环保运行,推动港口行业持续发展。

参考文献

- [1]尹超裕.港口码头工程结构设计的策略研究[J].水上安全,2024(14):175-177.
- [2]陈晨,全裕龙.宁波某内河港口作业区码头工程水工结构设计方案研究[J].珠江水运,2023(11):9-11.
- [3]邱智锦.面向深水码头的港口工程结构优化与耐久性提升研究[J].现代工程科技,2025,4(22):49-52.
- [4]陆艺菲,黄升娅.复杂地质条件下深水港口码头结构勘察优化方法[J].珠江水运,2025(23):26-28.
- [5]张蕊,冯浩,潘文博.开敞式海域复杂流态下新型码头结构设计[J].水运工程,2025(3):8-14,28.