

桩基选型对重件出运平台受力的影响分析

武万国, 卜鑫涛

(中交天津港湾工程设计院有限公司)

摘 要: 重件出运平台作为海洋工程、风电装备制造及重型设备运输等领域的关键基础设施, 其结构性能直接关系到工程安全与运营效率。针对重件出运平台的特殊荷载需求, 系统分析了桩基选型对平台受力性能的影响机制。通过分析不同桩基类型、布置形式及几何参数在竖向荷载、水平荷载及复杂工况下的力学响应, 结合实际工程案例, 提出了优化桩基设计、改善平台受力状态的有效途径。研究表明, 科学合理的桩基选型可显著提升重件出运平台的承载能力及整体稳定性, 在一定情况下, 选择大直径 PHC 桩更有利于桩基施工和节约投资, 对类似工程的设计与优化具有参考价值。

关键词: 重件出运平台; 桩基选型; 高桩墩台; 受力分析; 优化设计

0 引言

随着海洋资源开发、风电产业及重型装备制造业的快速发展, 重件出运平台作为连接陆地与水域、承担大型结构物吊装、转运及出运的关键节点, 其结构性能直接影响工程建设的效率与安全。重件出运平台通常需承受数百吨乃至上千吨的集中荷载, 且同时应对船舶撞击、系缆力、风浪流等复杂环境作用。在此背景下, 高桩墩台结构因其能够有效跨越软弱土层、将荷载传递至深层持力层, 并为重型移动吊装设备提供稳定支撑, 而成为重件出运平台的主要结构形式^[1]。

桩基作为高桩墩台结构的基础, 其选型直接影响平台的承载力、刚度、稳定性及经济性。尤其在软土地区(如天津港等), 桩基选型与布置对控制平台沉降、分配内力至关重要。实际工程中, 桩基选型需综合考虑地质条件、荷载特性、施工条件及经济因素, 是一个多目标决策过程, 合理选型与布置可以保障超大荷载作用下平台的安全与正常使用^[2]。

目前, 针对桩基选型在重件出运平台系统影响的研究仍相对分散, 缺乏针对桩型、布置参数与平台整体受力性能间关联性的深入剖析。因此, 本文旨在梳理桩基选型的关键因素, 分析其对重件出运平台受力性能的影响机制, 并结合实际工程案例, 分析桩型对结构的受力影响, 从施工难度、工程投资等角度选出最优方案, 为平台桩基的选型及优化设计提供理论依据与实践指导。

1 重件出运平台结构体系与荷载特性

1.1 高桩墩台结构体系组成与特点

重件出运平台常采用高桩墩台结构, 该结构体系主要由上部墩台、桩基及连接构件 3 部分组成。上部墩台通常为厚实的钢筋混凝土承台, 提供足够的刚度和面积以布置滑道、支承重型机械(如扒杆起重机)并分散荷载; 桩基包括直桩和斜桩, 构成空间框架, 将墩台荷载传递至深层地基; 连接构件则确保桩与墩台的协同工作。这种结构体系的主要特点包括: 1) 承载力高。通过长桩穿越软弱土层, 利用深部持力层提供较高的承载力。2) 透空性好。在水位变化大的水域, 通过增大桩间距, 桩列间形成透水缓流, 减小水流阻力和泥沙淤积。3) 刚度大、稳定性好。墩台结构整体刚度大, 再结合斜桩布置, 能够有效抵抗水平荷载和倾覆力矩^[3]。4) 适应性强。能灵活调整桩基布置和墩台尺寸, 满足特定荷载和工艺需求。

1.2 荷载特性与传力机制

重件出运平台的荷载复杂且庞大, 包括: 1) 竖向荷载。重型设备(如龙门吊、履带吊)自重、出运重件重量(可达数百吨)及平台自重, 通常为集中荷载, 通过滑靴或支腿作用于墩台特定区域。2) 水平荷载。包括船舶靠泊产生的撞击力、系缆力, 以及风荷载、水流力等, 此外起重机运行时也会产生水平制动力和倾覆力矩。3) 动态荷载。重型设备启制动、波浪冲击等可能引起动力响应, 需考虑疲劳效应^[4]。荷载传递路径为: 上部荷载→

墩台→桩基→深层地基。墩台作为转换构件,将集中荷载分散至群桩,桩基依据其布置(直桩、斜桩)分别承担竖向和水平分量,最终荷载通过桩侧摩阻力和桩端阻力传递至深层地基。在软土地区,桩基承担了绝大部分荷载,如CFG桩网复合地基中,桩体可分担一半以上荷载^[5]。

1.3 平台变形控制要求

为确保重件出运作业的安全与精度,平台变形控制至关重要。控制指标主要包括:1)总沉降量与差异沉降。需限制在允许范围内,避免影响轨道平整度和设备运行。2)水平位移。控制桩顶水平变位,保障结构抗倾覆稳定性。3)墩台挠度。保证墩台在荷载下不致产生过大变形影响上部设备使用。

2 桩基选型对平台受力性能的影响

桩基选型是决定重件出运平台受力性能的核心环节,主要包括桩型材料、布置形式及几何参数等方面。合理的选型能优化荷载传递路径、改善结构内力分布、有效控制变形。

2.1 桩型材料的影响机制

重件出运平台常用桩型主要包括PHC桩、钢管桩及灌注桩等,其材料特性直接决定桩基的承载性能与适用条件。PHC桩具有较高的抗压强度和耐久性,且造价相对经济,在主要以竖向荷载为主、腐蚀环境不严重的条件下应用广泛。但其抗弯能力相对有限,在承受较大水平荷载或弯矩时可能存在不足。钢管桩则凭借其优异的抗弯、抗剪强度和延性,更适合承受显著水平荷载(如船舶撞击、系缆力)或需要穿越坚硬地层的情况。特殊情况下,钢管桩可通过调整壁厚来增强承载力。此外,钢管桩接头可靠,施工方便,但需注意防腐处理。灌注桩具有较强的地层适应性,可在复杂地质中成桩,嵌岩灌注桩能利用岩石的高承载力,具有较高的单桩承载力。灌注桩群桩沉降量小且均匀,桩长和桩径不受标准化限制,沉桩过程中无振动噪音,对相邻建筑和岸坡稳定的影响小。但其施工效率低、对大型作业平台依赖度高、施工成本高、质量控制难度高、施工要求高。

2.2 桩基布置形式的影响机制

桩基的平面和立面布置形式直接影响平台的整体刚度、承载力及荷载分配效率。直桩与斜桩的组合布置是提高平台水平承载力的关键措施。斜桩通过其轴向刚度来抵抗水平荷载,能显著减

小桩顶水平位移和桩身弯矩。研究与实践表明,在水平荷载较大的区域采用斜桩是必要的,利用三角形重心原理优化桩基布置,能有效提高承台承受水平荷载的能力^[3]。桩距和桩数的确定需平衡群桩效应与结构效率。桩距过小可能导致群桩效应显著,降低单桩承载力;桩距过大则需加大承台尺寸,可能增加造价。相关研究指出,通过建立桩基受力最优化数学模型,可以考虑多种荷载工况,实现最少桩数下的受力最优布置,相比传统方法可减少10%~20%的桩基数量^[6]。桩基的排列方式(如行列式、梅花式)也会影响承台内力和桩顶反力分布。在软土地区的海工平台出运滑道设计中,通过有限元分析对比不同平面布置形式下的结构内力和变形,是确定最终优化方案的重要方法。

2.3 桩基几何参数的影响分析

桩基的几何参数如桩长、桩径和壁厚(对于管桩),对平台受力性能具有显著影响。增加桩长可以提高桩基的竖向承载力和抵抗沉降的能力,尤其是在深厚软土地基中。然而,对于超长桩,需关注其压屈稳定性和沉桩可行性。在超长桩基栈桥中,桩体最大Mises应力与入土深度呈正相关,但桩长增加也会导致桩身位移和组合应力值增大,对栈桥稳定性存在不利影响,需综合评估^[4]。增大桩径和壁厚能显著提高桩的抗弯刚度和承载力,减小桩身应力和位移。相关研究指出,桩体最大Mises应力、竖向应力与桩径及壁厚呈负相关。因此,在水平荷载较大或竖向荷载集中的区域,常采用大直径厚壁桩。

3 桩基优化设计案例

3.1 工程概况

珠海港高栏港区珠海巨涛码头二期工程位于珠海港高栏港区黄茅海作业区内,建设1个5万吨级通用泊位,泊位长度320 m,码头年装卸量海工模块约15万t,工程总平面布置见图1。原设计可满足1.5万t以下常规模块采用SPMT滚装出运、部分小型构件采用履带吊吊装出运以及远期部分小型构件采用门机吊装出运的工艺要求,因建设单位计划继续承接3.8万t换流站组块建造业务,组块从码头主出运通道采用滑道梁出运,需要对码头水工结构进行调整。本文以主出运通道水域段高桩墩台为研究对象,探究桩基选型对结构受力、投资变化的影响。

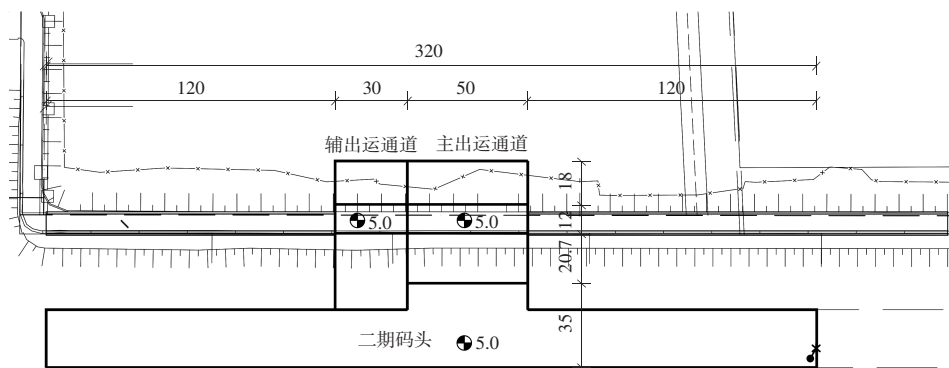


图 1 工程总平面布置图(m)

3.1.1 地质

工程区域内地层主要分为人工填土层(Q_4^{ml})、第四系海陆交互沉积层(Q_4^{mc})、残积层(Q^d)、基岩层,表层存在约 25 m 厚的淤泥层,土质较差,以全风化花岗岩 $④_1$ 及以下地层作为桩端持力层。由于部分钻孔有淤泥质土夹层,设计时考虑了 $②_2$ 淤泥层及以上土层的负摩阻影响, $②_5$ 淤泥质土层埋设深度 38 m 左右,满足 $\sigma_z=0.1\sigma_c$ 的规范要求^[7],其中 σ_z 为计算深度处地基垂直附加应力设计值, σ_c 为计算深度处地基自重压力设计值,不计负摩阻影响。主要土层参数见表 1。

表 1 主要土层参数

土层编号	土层	标贯击数/击	高程/m
$②_2$	淤泥	8	-26.90~-9.64
$②_3$	粉质黏土	8	-47.01~-18.08
$②_4$	中砂	9	-36.33~-24.64
$②_5$	淤泥质土	10	-44.73~-31.24
$②_6$	粗砂	11	-47.74~-28.74
$③$	砂质黏性土	21	-55.95~-37.04
$④_1$	全风化花岗岩	73	-52.86~-42.01
$④_2$	强风化花岗岩	75	-55.95~-41.02

3.1.2 工艺荷载

出运通道工艺荷载主要包括:1) 码头堆载 20 kPa;2) 流机荷载 100 t 平板拖车;3) 50 t 门机轨距 12 m,基距 14 m,每支腿轮数 12 个,轮距 1 m,最大轮压 370 kN,考虑双机作业,门机垂直、平行于轨道的水平力按轮压的 10% 考虑;4) 运输机械荷载为自行式模块运输车(简称 SPMT),60 t/轴,局部荷载等效简化为 200 kPa;300 t、500 t、1 250 t 履带吊;5) 换流站组块重 32 000 t,甲板支撑框架(简称 DSF)重 6 400 t,通过 4 条滑道梁(宽 2 m,高 1 m,中心距 11.5 m)从主出运通道出运,出运通道水域段考虑重力分布不平衡系数

1.5,组块折算线荷载 3 030 kN/m,滑道摩擦系数 0.02,总水平力 8 484 kN;6) 滚装连接桥荷载为沿码头前沿方向 125 kN/m。

3.2 桩基选型对结构受力的影响分析

3.2.1 桩基布置

出运通道水域段原设计墩台尺寸为 50 m × 35 m × 1.8 m,桩基采用 $\phi 800$ mm PHC 桩,桩间距 3 m × 3.2 m 可满足除组块出运以外的其它使用要求。本文选定钢管桩、PHC 桩作为变更设计的备选桩型,桩基布置方案见表 2。

表 2 桩基布置方案

方案序号	桩型	桩径/mm	方案布置
方案一	钢管桩	800	桩间距 3 m×3.2 m, 桩长 68 m
方案二	PHC 桩	800	桩间距 3 m×3.2 m, 桩长 66 m
方案三		1 000	桩间距 3 m×3.2 m, 桩长 60 m
方案四		1 200	桩间距 3.6 m×3.6 m, 桩长 52 m
方案五		1 200	桩间距 3 m×3.2 m, 桩长 48 m

3.2.2 计算模型

采用有限元分析软件 Autodesk Robot Structural Analysis 对墩台进行受力分析,桩的计算采用假想嵌固点法,墩台为刚性结构^[8],墩台计算模型如图 2 所示。

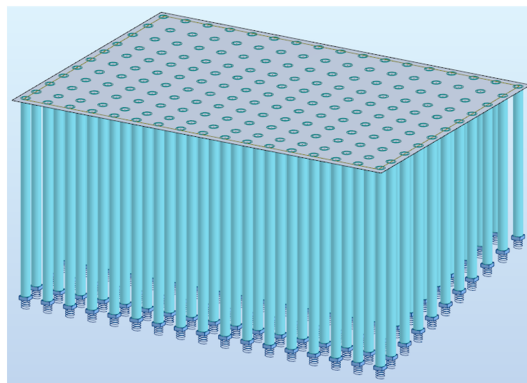


图 2 墩台计算模型

3.2.3 计算结果分析

桩基、墩台主要计算结果见表 3、表 4。

表 3 桩基计算结果

方案序号	最大压桩力/kN	桩身最大弯矩/(kN·m ⁻¹)	桩基承载力/kN	计算入岩深度/m	岩层
方案一	5 491	707	5 520	5.7~9.7	中风化花岗岩
方案二	5 323	734	5 418	3.7~7.7	中风化花岗岩
方案三	5 357	752	5 415	1.6~8.0	强风化花岗岩
方案四	6 697	1 059	6 713	1.5~5.5	强风化花岗岩
方案五	5 397	858	5 568	1.2~2.0	强风化花岗岩

表 4 墩台内力计算结果

方案序号	M_{xx} 最大正弯矩/(kN·m)	M_{yy} 最大正弯矩/(kN·m)	M_{xx} 最大负弯矩/(kN·m)	M_{yy} 最大负弯矩/(kN·m)	墩台计算厚度/m
方案一	1 359	6 604	-9 754	-11 997	3.6
方案二	2 705	3 580	-6 862	-5 948	3.0
方案三	3 161	2 818	-5 991	-4 115	2.7
方案四	3 580	3 339	-6 524	-5 306	2.8
方案五	3 094	2 854	-6 137	-4 307	2.8

注： M_{xx} 为平行码头方向弯矩； M_{yy} 为垂直码头方向弯矩。

1) 桩型对受力的影响

当桩基采用 $\phi 800$ mm 钢管桩和 $\phi 800$ mmPHC 桩时，其最大压桩力和桩身最大弯矩基本接近。在满足承载力要求的情况下，钢管桩和 PHC 桩桩底均需进入中风化岩层。根据施工难度分析，方案一、方案二均需引孔，且引孔深度需满足嵌岩深度要求，整体施工难度较大，施工进度缓慢。根据计算结果，方案一墩台负弯矩较大，在满足结构配筋要求的情况下，墩台厚度(原设计 2.2 m)需增大 1.4 m，经济性较差。方案二墩台负弯矩相对原设计($M_{xx}=-3\,106$ kN·m, $M_{yy}=-2\,055$ kN·m)有所增大，也需增加 0.8 m 墩台厚度，同样不经济。就墩台受力而言，钢管桩对墩台整体刚度贡献较小，使墩台变形大，PHC 桩对墩台整体刚度贡献大，能有效约束墩台变形，更有利于墩台受力。

2) 桩径对受力的影响

当桩基均采用 PHC 桩时，方案三、方案五的最大压桩力基本一致。在满足承载力要求的情况下， $\phi 1\,000$ mmPHC 桩桩底最多进入强风化岩层 8 m，局部贯穿强风化岩层，需做引孔处理，施工难度大。 $\phi 1\,200$ mmPHC 桩进入强风化岩层 2 m，桩底未贯穿强风化岩层，能够满足施工要求。结合墩台弯矩进行分析，当桩间距维持原设计时，桩径

增大，桩身抗弯能力提高，墩台基础整体刚度增强，墩台需要承担由桩身传递过来的更大弯矩。

3) 桩间距对受力的影响

当桩基采用 $\phi 1\,200$ mmPHC 桩时，方案四的最大压桩力、桩身最大弯矩和墩台最大弯矩均比方案五大，且进入中风化岩层深度多达 5.5 m，局部贯穿强风化岩层并做引孔处理，同时桩身抗弯差，施工难度大。由表 2、表 3 可以看出，增大桩间距，单桩受力增大，桩端进入持力层深度要求更高，墩台能承受更大弯矩。综合来看，适当缩小桩间距，有利于墩台受力。

3.3 桩基方案比选

3.3.1 桩基施工可行性分析

根据上述计算结果，结合本工程地质情况，分析各桩型施工的可实施性。桩基采用 $\phi 800$ mm 钢管桩时，桩底需嵌入中风化岩层，嵌岩段施工较为困难，效率较慢；采用 $\phi 1\,000$ mmPHC 桩时，桩底需嵌入强风化岩层 1.6~8 m，局部区域施工难度大；采用 $\phi 1\,200$ mmPHC 桩时，如桩位维持原设计，桩底仅需嵌入强风化岩层 2 m，可满足常规施工要求。无论更换何种桩型，按照相关要求，均需重新进行防洪影响评价。经综合分析，桩基选用 $\phi 1\,200$ mmPHC 桩，施工可行性最高。

3.3.2 投资费用分析

各方案投资费用见表 5。由表 5 可知，桩基采用 $\phi 1\,200$ mmPHC 桩，工程投资费用增加较少，能够满足建设单位变更要求。从投资费用增加金额考虑，方案五为最优方案。

表 5 投资费用

方案	费用较原设计增加金额/万元
方案一($\phi 800$ mm 钢管桩)	4 235
方案二($\phi 800$ mmPHC 桩)	2 317
方案三($\phi 1\,000$ mmPHC 桩)	2 243
方案四($\phi 1\,200$ mmPHC 桩)	1 952
方案五($\phi 1\,200$ mmPHC 桩)	1 607

4 结语

桩基选型对重件出运平台的受力性能具有决定性影响。本文通过系统分析并结合实际工程案例，得出以下主要结论：

1) 桩基选型是平台安全与经济性的基础。针对重件出运平台荷载大、受力复杂的特点，高桩墩台结构是优选方案。桩型材料的选择需综合考

考虑竖向、水平荷载及环境腐蚀性，确保桩基自身的承载能力和耐久性。

2) 桩基布置形式直接决定平台整体工作性能。直桩与斜桩的合理组合是抵抗水平荷载与倾覆力矩的有效措施。通过优化桩距、桩数及排列方式，可以改善群桩效应，优化承台内力分布，并在满足安全的前提下实现经济效益。

3) 通过实际工程案例表明，钢管桩对墩台整体刚度贡献较小，使墩台变形大，PHC 桩对墩台整体刚度贡献大，能有效约束墩台变形，更有利于墩台受力。对于 PHC 桩，当桩径增大时，桩身抗弯能力提高，墩台基础整体刚度增强，墩台需要承担由桩身传递过来的更大弯矩；增大桩间距，单桩受力增大，桩端进入持力层深度要求更高，墩台能承受更大弯矩；在一定情况下，适

当缩小桩间距，有利于墩台受力。

参考文献：

- [1] 吴爱清,程凯,宋成涛.某海洋重工产品出运码头结构的设计与施工[J].水道港口,2013,34(5):448-452.
- [2] 陆俊,胡少伟,范向前,等.超大荷载作用下码头高桩墩台原型试验与分析[J].水运工程,2015(7):66-70.
- [3] 徐启文.提高重件码头高桩承台水平承载能力的分析[J].水运工程,2006(9):28-31.
- [4] 胡小雪.超长桩基栈桥及施工平台结构力学特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [5] 李威,周春儿,吴加武,等.重载堆场桩网复合地基离心模型试验与数值模拟研究[J].岩土工程学报,2022,44(S2):71-75.
- [6] 周锡初,高阅春,王晖.外海高桩墩式承台的基桩受力最优化数学模型[J].水利学报,1999(6):77-83.
- [7] JTS 147—2017 水运工程地基设计规范[S].
- [8] 刘祥玉,刘健.重大件出运码头墩台结构计算要点分析[J].港工技术,2020,57(S1):94-97.