

复杂水文地质条件下水上倾斜桩基施工平台结构设计

成涛^{1,2,3}, 付甦^{1,2,3}, 邓松涛^{1,2,3}(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430014; 2. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430014;
3. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430014)

摘要:结合岱山港鱼山取水口桩基施工平台设计,介绍了在复杂水文地质条件下,采用钢护筒及钢管桩组合的支撑体系搭建水上桩基施工平台,由于多数桩基入土较浅且多为斜桩,侧向刚度较弱,无法抵抗台风期的风-浪-流等水平荷载,该文介绍了所采取的几项措施提高平台整体侧向稳定性:①通过重点在浅覆土的桩基处抛填碎石,改善桩基边界条件;②优先选择平台四周角部及入土较浅的桩基进行混凝土灌注桩施工。有效解决了由于地势起伏大、水文及地层条件复杂以及桩基倾斜方向不一造成平台侧向稳定性不足的设计难题,可为类似工程的设计提供参考。

关键词:桩基施工;地势起伏;侧向稳定;边界设计

中图分类号:U443

文献标志码:A

0 引言

水上桩基施工平台为辅助水中钻孔桩施工的临时结构设施,它提供了钻机、起吊设备作业、混凝土罐车行走、机具材料堆放的水上作业平台。桩基施工平台方案的选择除了考虑机械设备、工期以及经济等因素外,还需重点关注平台所处区域的水文气象、河床地形以及覆盖层厚度等水文地质条件。目前常见的水上桩基施工平台有钢管桩平台、钢护筒平台、钢围堰平台以及浮式平台4种形式。任回兴等^[1]针对苏通大桥特殊的水文地质条件,对钢管桩平台和钢护筒平台两种方案从安全性、经济性以及合理性等方面进行了综合对比分析;罗超云等^[2]、王安等^[3]、张明闪等^[4]依托实际工程,分析了钢管桩-钢护筒组合平台结构受力并介绍了相关施工工艺及施工要点;周祖清^[5]依托京福铁路古田溪特大桥7#墩桩基施工项目,该项目位于深水和倾斜、裸露、坚硬岩石河床之上,钢管桩及钢护筒无法打入河床稳定,经过多种方案比选,最终选择了固脚钢围堰+钢护筒组合平台;顾元威等^[6]、吴群惠^[7]则分别介绍了浮动平台和浮箱平台在女姑山特大桥和泰和赣江特大桥桩基施工中的应用;潘一强^[8]介绍了深水平台辅助桩稳

桩工艺;周宏等^[9]以中埠大桥深水基础,提出3种护筒施工平台搭设方案;彭光辉等^[10]依托平潭海峡公铁两用大桥桩基施工项目,探索出安全的落岩区平台搭设技术;范超远^[11]依托黔江特大桥桩基施工项目,针对裸岩地质提出锚杆锚固方案固定钢管桩。

本文以岱山港鱼山取水口桩基施工平台为例,对在复杂水文地质条件下平台设计的难点进行分析并提出相应解决办法,对在设计过程中需要重点关注的控制点进行论述,以确保此类平台的安全,可为类似工程的设计提供参考。

1 工程概况

拟建浙石化4 000万t/年炼化一体化项目配套码头工程取水口场地位于舟山市岱山县鱼山乡,拟建工程主要由取水平台和引水槽等组成。其中取水口平台设计总长80.0 m,宽50.0 m,取水口平台采用高桩梁板式结构,基础形式采用灌注桩基础,桩型采用嵌岩桩(岩面以上部分桩径1 800 mm,嵌岩部分桩径1 650 mm),与取水口平台搭接的引桥桩型采用 ϕ 1 200 mm灌注桩,斜桩斜率有6:1、7:1、8:1、9:1共4种形式。项目所处地势起伏较大,河床标高及泥面标高均差异较大,地层分布不均,平台区域涉及12处

钻孔资料,钻孔资料显示最小覆土厚度不足1 m,最大覆土厚度近14 m,由上至下土层大致可分为:①素填土;②淤泥质粉质黏土;③粉质黏土;④角砾;⑤强风化凝灰岩;⑥中等风化凝灰岩。

舟山地区是易受台风影响的地区,岱山港区鱼山作业区南部作业区水文测验技术报告显示5—11月均有台风影响,台风频数5—8月呈逐月递增,8—11月呈逐月递减,台风主要集中在7—9月。勘察区属亚热带季风气候区,灾害性天气较多,春季降水丰沛,且降水时间长;初夏因冷热高压对峙,造成连绵不断的黄梅雨;盛夏受太平洋副热带高压控制,盛行东南风。

依据本项目总体工期要求,在台风来临前,要完成平台施工任务,并确保平台安全渡过台风期。

2 工程难点及解决办法

2.1 工程难点

(1) 地势起伏较大,持力层覆土厚度深浅不一,水文条件较复杂,护筒打入角度和深度均不同,桩基设计标高以及边界条件难以确定。

(2) 由于平台需要抵抗各个方向的风-浪-流,导致单一方向侧向刚度不足,不足以抵抗台风期的风-浪-流等水平荷载。

(3) 由于现场打桩船无法实时供应,平台所有桩基需要连续施工,无法做到跟进锚固,且台风将至,平台搭建完成后没有足够工期完成所有混凝土灌注桩施工,如果混凝土灌注桩分布不合理,平台就无法安全渡过台风期。

2.2 解决办法

(1) 经过计算,项目部提供的桩底设计标高无法满足抗压承载力要求,必须保证平台桩基全断面打入中风化凝灰岩,沉桩主要以贯入度控制,标高作为校核标准;根据《码头结构设计规范》(JTS 167—2018)^[12]中对弹性长桩、中长桩、刚性桩的划分标准,平台桩基包含了这3种类型,其中尤以刚性桩居多。

(2) 刚性桩与中长桩的分界限值为桩基入土11 m,综合考虑建议项目部应重点在入土深度为7~11 m的桩基位置抛填碎石,使桩基入土深度达到11 m,应选择石质坚硬、遇水不易水解且粒径为0.4 m左右的碎石,适当提高覆土厚度可以突出改善介于刚性

桩与中长桩之间桩基的边界条件,进而提高平台桩基侧向刚度,但计算过程中需重点关注中长桩的桩侧土压力是否满足规范要求。

(3) 经反复试算发现,宜选择平台四周角部及入土较浅的桩优先进行钻孔成桩施工,结合现场钻孔作业条件,应避免桩位相邻,最大程度保证现场钻机能够同时作业,如此可在较短工期内使平台达到渡过台风期要求。

3 钢平台设计

3.1 平台结构

岱山港鱼山取水口桩基施工平台长、宽分别为81 m、65 m,辅助完成86根嵌岩桩以及4根灌注桩施工。

平台支撑体系选择钢护筒+钢管桩组合形式,平台桩位布置图及总平面布置图见图1。平台区利用钢护筒作为基础,平台外侧打辅助钢管桩,深水区采用 $\phi 1\,000\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 钢管、浅水区采用 $\phi 800\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 钢管,辅助桩、钢护筒之间采用 $\phi 600\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 平联和 $\phi 500\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 斜撑连接。钢护筒两侧设2HM588 \times 300牛腿,与辅助桩共同搭设主横梁4I40a型钢,主纵梁采用321型贝雷片,横向分配梁采用型钢I25a@200 mm,平台立面布置图见图2。

平台施工工艺流程如下:

步骤1:选择水流流速及风浪较小时,施打钢护筒及钢管桩。

步骤2:钢护筒及钢管桩施打到位后,及时焊接平联、斜撑、牛腿及主横梁。

步骤3:安装贝雷架及上部结构,逐步完成平台搭设。

步骤4:安装护栏及护轮坎等防护措施,设置警示标牌及功能分区警示标识。

步骤5:在台风来临前完成1[#]、10[#]、13[#]、20[#]、23[#]、34[#]、75[#]、77[#]、79[#]、81[#]桩钻孔成桩施工。

步骤6:完成其他桩钻孔成桩施工。

步骤7:平台使用到期后,自上而下逐步拆除各构件。

3.2 设计荷载

(1) 车辆/设备荷载

25 t汽车吊,整机重33 t,最大起重量25 t,轴荷

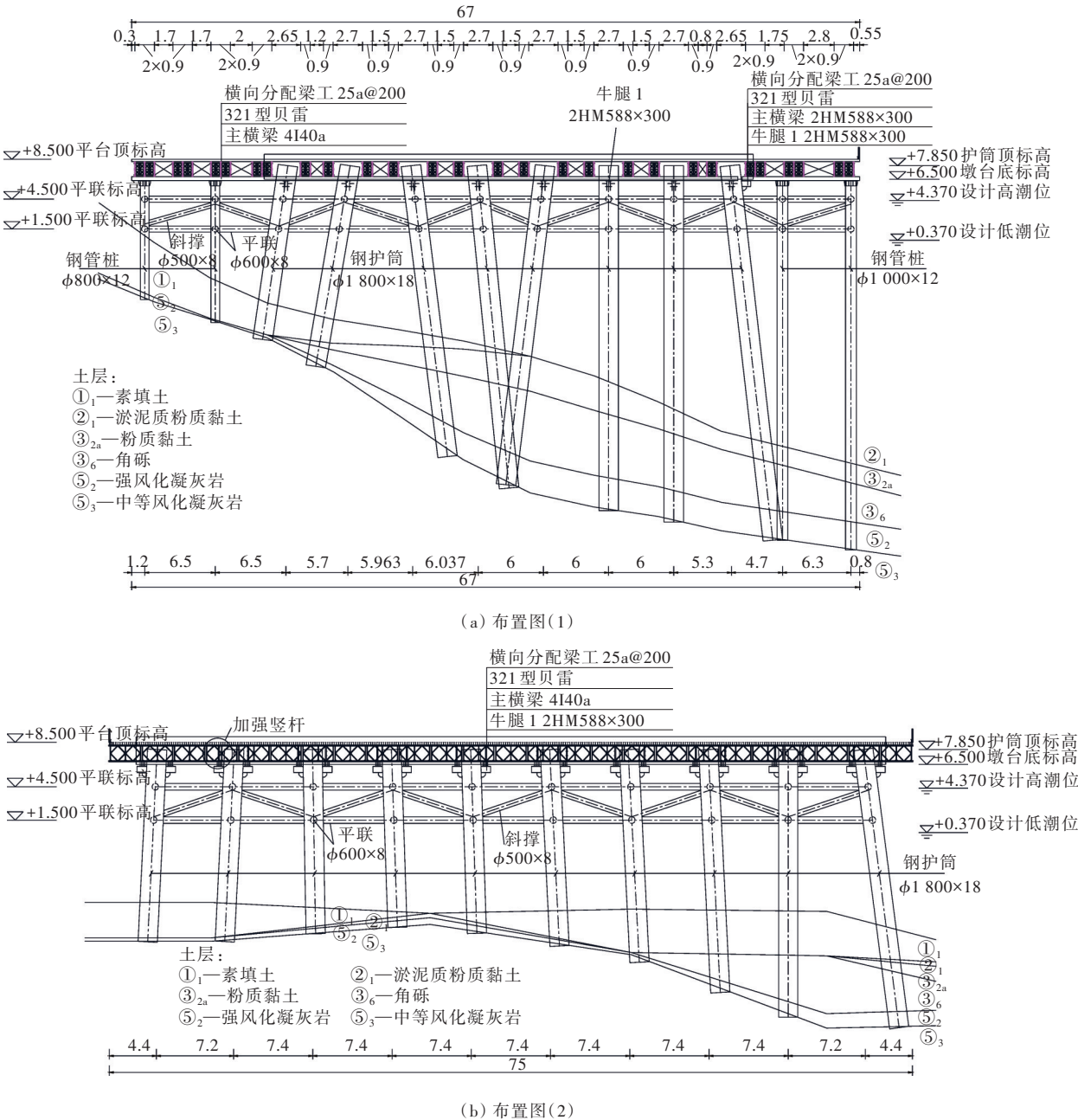


图2 平台立面布置图(除斜撑、平联、钢护筒、钢管桩的尺寸单位为mm外,其余单位:m)

载:(74+128+128) kN,支腿跨距(横向×纵向): 数1.2。
6.4 m×5.65 m。

75 t汽车吊,整机重46 t,最大起重量32 t,轴荷载:(100+100+130+130) kN,支腿跨距(横向×纵向):7.90 m×8.45 m。

(2) 钻机荷载

冲击钻机:JKL15 t冲击钻机,总重30 t,其中主机重15.2 t、锤头重14.8 t,考虑冲击系数1.3。

回旋钻机:JZP300气举反循环钻机,最大重量62 t,其中主机重32 t,钻头配重可调节,考虑冲击系

(3) 堆载

施工平台考虑堆载10 kPa。

(4) 水动力

水流流速 $V=1.4$ m/s。

(5) 波浪力

工作期:波高 $H=1$ m,周期 $T=5.7$ s;

非工作期:波高 $H=3.05$ m,周期 $T=5.7$ s。

(6) 风荷载

工作风速:13.8 m/s(6级);

最大风速:37.2 m/s。

3.3 计算分析

工况及边界条件说明见表1,每种工况均需考虑4个方向的水-浪-流组合作用。

表1 工况及边界条件说明

工况	说明	边界条件	分析关键点
1	平台桩基、平联、斜撑搭设完成,此时结构仅能承受工作状态风-浪-流荷载,此时抗拔较不利	钢护筒和钢管桩根据桩基不同的入土深度,分别按桩底固结、弹性连接或采用m法弹簧来模拟	桩基抗拔
2	平台牛腿、主横梁、贝雷、分配梁搭设完成,此时结构仅能承受工作状态风-浪-流荷载、车辆/设备荷载、堆载	同工况1	桩基抗压;贝雷剪力、弯矩;桩基、主横梁、分配梁应力、桩基压弯稳定;牛腿根部焊缝强度;贝雷、主横梁跨中竖向位移
3	1#、10#、13#、20#、23#、34#、75#、77#、79#、81#护筒需在台风来临前完成混凝土灌注桩施工,此结构可渡台	混凝土灌注桩按弹性长桩考虑,在嵌固点固结,其余桩基约束同工况1、2	桩基抗拔;桩基、平联、斜撑应力;桩基、平联、斜撑压弯稳定;平联、斜撑端部焊缝强度;中长桩及刚性桩侧土体水平压应力;桩顶水平位移

每种工况需针对表1所列分析关键点进行重点研究,本工程重难点主要集中在台风工况,故重点分析工况3设计过程。

(1) 在台风工况中的风-浪-流水平荷载作用下,用于工况1和工况2中的桩基边界条件会发生改变,部分中长桩桩侧土体水平压应力不满足规范要求,需按刚性桩考虑,平台桩基整体侧向刚度减弱。

(2) 台风作用下,部分桩基抗拔承载力不够,试算过程中需要释放对应桩端竖向约束,进而又会影响周围桩端抗拔力,由于地质条件的原因,几乎每根桩的抗拔承载力均不相同,需不断进行试算对比,直到所有桩基抗拔力设计值均满足规范要求。

(3) 在不错桩的情况下,台风工况的桩端约束与工作工况的桩端约束相比,水平方向偏柔性,侧向刚度减弱,抵抗水平荷载的能力更差,平联、斜撑的受

力不满足规范要求,需在台风来临前尽可能多地完成混凝土灌注桩施工,提高平台整体侧向稳定性。

本工程最大的困难在于特殊的水文地质环境导致平台桩基单一方向侧向刚度不足,可采取如下措施提高桩基侧向刚度:

(1) 重点在入土较浅的桩基处抛填碎石,通过提高桩基入土深度的方式使部分适用于刚性桩的桩基转变成中长桩,能一定程度改善平台桩基侧土压力状态,提高平台抵抗水平荷载的能力。

(2) 台风来临前需尽可能多地完成混凝土灌注桩施工,一方面由于灌注桩本身自重的原因对抗拔更有利;另一方面其自身抗弯刚度的提高可有效提高平台整体侧向稳定性,但因为现场施工设备与工期的原因,成桩数量有限,因此混凝土灌注桩的分布位置至关重要。

Midas-Civil中采用梁单元模拟混凝土灌注桩,无法真实考虑其自身的抗弯性能,需手算其抗弯刚度,然后代入软件运算,嵌岩桩+钢护筒组合抗弯刚度计算如下:

$$\text{钢管部分: } I_s = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = \frac{\pi}{64} (1.8^4 - 1.764^4) = 0.04 \text{ m}^4, E_s I_s = 2.06 \times 10^8 \times 0.04 = 8.24 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2.$$

$$\text{混凝土部分: } I_c = \frac{\pi}{64} D^4 = \frac{\pi}{64} \times 1.65^4 = 0.364 \text{ m}^4, E_c I_c = 3.15 \times 10^7 \times 0.364 = 1.15 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2.$$

钢筋部分:(嵌岩部分桩剖面图见图3)

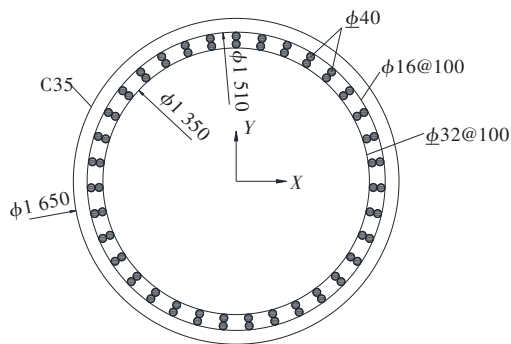


图3 嵌岩部分桩剖面图(单位:mm)

$$\text{主筋直径为 } 40 \text{ mm, 截面积 } A_a = \frac{\pi D^2}{4} = 1.26 \times 10^{-3} \text{ m}^2.$$

钢筋对其形心轴的截面惯性矩采用近似计算公式:

$$I_a=\sum_{i=1}^n A_a x_i^2=2.26 \times 10^{-2} \text{ m}^4$$

$$E_a I_a=2.06 \times 10^8 \times 2.26 \times 10^{-2}=4.65 \times 10^6 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

配筋钢管混凝土抗弯刚度为:

$$EI=E_s I_s+0.6 E_c I_c+E_a I_a=1.98 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

与钢护筒的抗弯刚度相比,单根护筒成桩后抗弯刚度提高了140%,由此可见混凝土灌注桩可以很大程度提高平台的侧向稳定性,应在台风来临前尽可能多地完成混凝土灌注桩施工。

由于现场钻机设备有限,工期较紧,试算过程中优先选择平台四周角部进行成桩施工,尽量避免桩位相邻,便于现场有足够的施工空间让钻机可以同时施工作业;其次是选择入土较浅的桩基,不仅本身抗弯刚度会提高,而且还会使刚性桩转变为弹性长桩,可以很大程度地提高平台侧向稳定性。试算过程中需不断修正模型的边界条件,对于抗拔力超限的桩基应释放其竖向约束;对于中长桩桩侧土压力超限的桩基应按刚性桩考虑。综合以上原则最终确定至少需要完成10根混凝土灌注桩施工,混凝土灌注桩分布如图4所示。

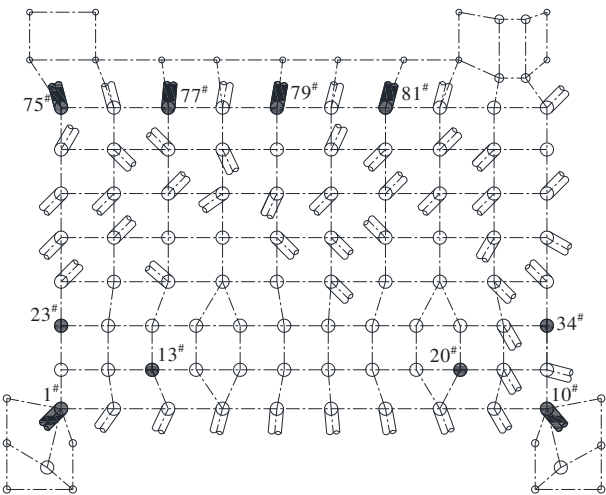


图4 混凝土灌注桩分布图

规范要求承受水平力的中长桩或刚性桩,其桩侧土体水平压应力应满足下列要求:

① 泥面以下 $h/3$ 处土的水平压应力:

$$\sigma_{h/3} \leq \frac{4}{\cos \varphi} \left(\frac{\gamma}{3} h \tan \varphi + c \right) \eta$$

② 泥面以下 h 处土的水平压应力:

$$\sigma_h \leq \frac{4}{\cos \varphi} (\gamma h \tan \varphi + c) \eta$$

式中: φ 为土的内摩擦角($^\circ$); c 为土的黏聚力(kPa); η 为考虑总荷载中恒载所占比例的影响系数; h 为桩的入土深度(m); γ 为土的重度(kN/m^3),对透水性材料,应考虑水的浮力作用。

桩侧土压力计算结果见表2,桩基拔力计算结果见表3。

表2 桩侧土压力结果

孔位	$\sigma_{h/3}/$ kPa	$h/3$ 处土体 承载力/kPa	$\sigma_h/$ kPa	h 处土体承 载力/kPa	是否满足 规范要求
K2	107	108	83	206	是
K7	117	123	101	224	是
K8	79	81	63	171	是

表3 桩基拔力计算结果

护筒 号	拔力 设计 值/kN	抗拔 承载 力/kN	是否满 足规范 要求	护筒 号	拔力 设计 值/kN	抗拔 承载 力/kN	是否满 足规范 要求
58#	952	1 421	是	33#	269	328	是
56#	811	2 276	是	53#	238	346	是
62#	753	1 035	是	39#	217	1 421	是
37#	703	2 276	是	63#	209	346	是
60#	639	1 035	是	4#	142	1 211	是
57#	599	2 276	是	35#	126	2 276	是
46#	578	2 276	是	9#	111	328	是
45#	572	2 276	是	52#	109	1 035	是
50#	511	1 035	是	6#	88	868	是
73#	478	1 334	是	7#	88	868	是
49#	476	1 421	是	55#	86	2 276	是
84#	434	1 334	是	43#	78	346	是
8#	315	868	是	5#	72	868	是
40#	313	1 035	是	69#	59	229	是
21#	293	328	是				

各构件应力计算结果见表4。

钢护筒材质为Q345B,321贝雷材质为16Mn,其余材料材质均为Q235B。

表4 各构件应力计算结果

构件名称及规格/ mm×mm	最大组合 应力/MPa	最大剪应 力/MPa	最大剪 力/kN	最大弯矩/ (kN·m)
钢护筒 $\phi 1\,800 \times 18$	89	—	—	—
钢护筒 $\phi 1\,200 \times 12$	73	—	—	—
辅助桩 $\phi 1\,000 \times 12$	99	—	—	—
辅助桩 $\phi 800 \times 12$	72	—	—	—

续表 4

构件名称及规格/ mm×mm	最大组合 应力/MPa	最大剪应 力/MPa	最大剪 力/kN	最大弯矩/ (kN·m)
平联 $\phi 600 \times 8$	180	—	—	—
斜撑 $\phi 500 \times 8$	184	—	—	—
主横梁 4140	148	15	—	—
牛腿 2HM588×300	30	29	—	—
分配梁 I25a	128	10	—	—
321 贝雷	—	—	109	133

平台水平方向最大位移 $\delta = 67 \text{ mm}$ 。

综上,平台强度及刚度在台风工况下均满足规范要求。

桩基承载力计算参照《码头结构设计规范》(JTS 167—2018)^[12],局部计算如桩基、平联、斜撑压弯稳定性计算参照《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[13],平联、斜撑焊缝强度计算参照《钢结构连接节点设计手册》^[14],在此不一一展开说明。

4 结论

依托实际工程项目,通过对特殊水文地质下的倾斜桩基施工平台抗台风工况设计过程具体分析,得出如下结论:

(1) 平台桩基入土深浅与平台整体侧向刚度大小密切相关,当平台整体侧向刚度不足时,重点选择在浅覆盖层桩基处通过抛填碎石的方式来改善中长桩及刚性桩桩侧土压力状态,进而改善平台桩基的边界条件。

(2) 优先选择平台四周角部及浅覆土的桩基进行混凝土灌注桩施工,混凝土灌注桩对平台整体侧向稳定性的改善体现在两个方面:① 桩基自身抗弯性能得到显著提升,理论计算得出配筋钢管混凝土

柱与钢护筒的抗弯刚度相比提高了 140%;② 可以通过提高桩基入土深度改善桩基边界条件,使部分刚性桩转为弹性长桩。

参考文献:

- [1] 任回兴,贺茂生,欧阳效勇,等.特殊水文地质条件下超大规模深水群桩基础施工技术[C]//第二届全国岩土与工程学术大会论文集(下册).北京:科学出版社,2006:215-222.
- [2] 罗超云,谭立心,文洁平,等.强涌潮水域大型水上钻孔平台的设计[J].公路,2012,57(8):89-93.
- [3] 王安,张凯.水上桩基施工钢护筒平台结构设计[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(5):63-67.
- [4] 张明闪,贾兵团,刘晨,等.深水强涌潮区钻孔钢平台设计与施工技术[J].公路,2013,58(3):119-123.
- [5] 周祖清.深水倾斜裸岩河床桩基施工平台设计与施工技术[J].铁道建筑技术,2013(4):24-28.
- [6] 顾元威,于吉太.女姑山跨海桥基施工用钢平台设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),1998,25(1):33-35.
- [7] 吴群慧.赣江特大桥深水基础施工控制[J].铁道工程学报,1998,15(4):65-70.
- [8] 潘一强.组合式深水施工平台设计与施工[J].中国港湾建设,2012,32(1):36-38.
- [9] 周宏,蒙媛.深水裸岩河床上钻孔桩护筒施工平台的搭设[J].施工技术,2009,38(5):69-70.
- [10] 彭光辉,钱立军.平潭海峡公铁两用大桥裸岩区施工平台搭建技术[J].施工技术,2018,47(16):83-85.
- [11] 范超远.深水裸岩桩基础施工平台结构分析与施工技术研究[D].长沙:中南大学,2012.
- [12] 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.
- [13] 中冶京城工程技术有限公司.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [14] 李星荣,魏才昂,秦斌.钢结构连接节点设计手册[M].3版.北京:中国建筑工业出版社,2014.