

密实卵石地质条件下钢管桩沉桩施工技术

陈亚峰, 郭彬

(中交三航局第三工程有限公司, 江苏 南京 210009)

[摘要] 萨尔瓦多位于火山活动频繁的拉丁美洲地区, 拟建码头所在海域的海底由火山灰和碎石堆积而成, 近岸为卵石滩。受涌浪长期影响, 海底上层形成 5~8m 厚密实卵石层, 其中部分区域卵石粒径较大, 下层为安山岩和凝灰岩。基于工程实际, 分析了该地质条件下的施工可行性, 提出了冲孔再沉桩工艺, 并采用高应变检测技术评估桩身完整性。研究表明, 冲孔再沉桩工艺在密实卵石层地质环境中具备良好稳定性和施工效果。

[关键词] 钢管桩; 密实卵石; 安山岩; 冲孔; 沉桩; 施工技术

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)18-0118-06

Construction Technology of Steel Pipe Pile Sinking Under Dense Pebble Geological Conditions

CHEN Yafeng, GUO Bin

(No. 3 Engineering Co., Ltd. of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd.,
Nanjing, Jiangsu 210009, China)

Abstract: El Salvador is located in a region of Latin America that is prone to frequent volcanic activity. The seabed in the area where the proposed pier will be constructed consists of volcanic ash and gravel deposits, with the nearshore area characterized by pebble beaches. Due to the long-term influence of surge waves, a dense pebble layer with a thickness of 5 ~ 8m forms in the upper seabed. In some areas, the pebble size is relatively large, while the underlying layers consist of andesite and tuff. Based on practical engineering considerations, this paper analyzes the feasibility of construction under these geological conditions and proposes a punching and pile-driving process. High-strain testing techniques were employed to assess the integrity of the piles. The study shows that the punching and pile-driving process exhibits good stability and construction effectiveness in the geological environment of dense pebble layer.

Keywords: steel pipe piles; dense pebbles; andesite; punching; pile sinking; construction

1 工程概况

1.1 工程设计

拟建码头位于萨尔瓦多拉利伯塔德港海岸, 规划为垂直于岸边的栈桥式结构, 总长 200m。该码头设计包括主引桥宽度 8.3m, 码头宽度 16m, 以及一个长 40m、宽 25m 的景观平台(见图 1)。考虑到码头的使用荷载、涌浪影响和地震条件, 设计方案采用 $\phi 800$ 钢管桩、96cm(高) $\times$ 160cm(宽)现浇横梁、40cm 厚预制面板及 23cm 厚现浇面层。钢管桩采用

壁厚 18mm 螺旋管桩, 在桩顶和桩尖 1m 范围内增设 18mm 厚加强环, 并在外壁包裹 3mm 厚玻璃钢进行防腐处理, 防腐范围从桩顶至泥面下 1.5m。根据地质条件, 桩的设计长度范围为 17~31m, 入土深度为 15~18m。这一设计方案旨在确保码头结构稳固性与耐用性, 适应各种环境和荷载条件。

1.2 地质条件

萨尔瓦多全国以山地和高原地形为主, 地势起伏显著, 且火山活动频繁, 平均海拔约 650.000m。本项目位于萨尔瓦多南部沿海地区, 该区域受太平洋的长期冲刷影响, 地势相对较低。工程海域的海底主要由火山爆发产生的火山灰和落石淤积而成。在长周期涌浪的持续作用下, 尤其是每年 3~4 次巨

[作者简介] 陈亚峰, 副总经理, 高级工程师, E-mail: 13776565636@139.com

[通信作者] 郭彬, 海外管理部副经理, 高级工程师, E-mail: 15105157005@139.com

[收稿日期] 2025-03-26

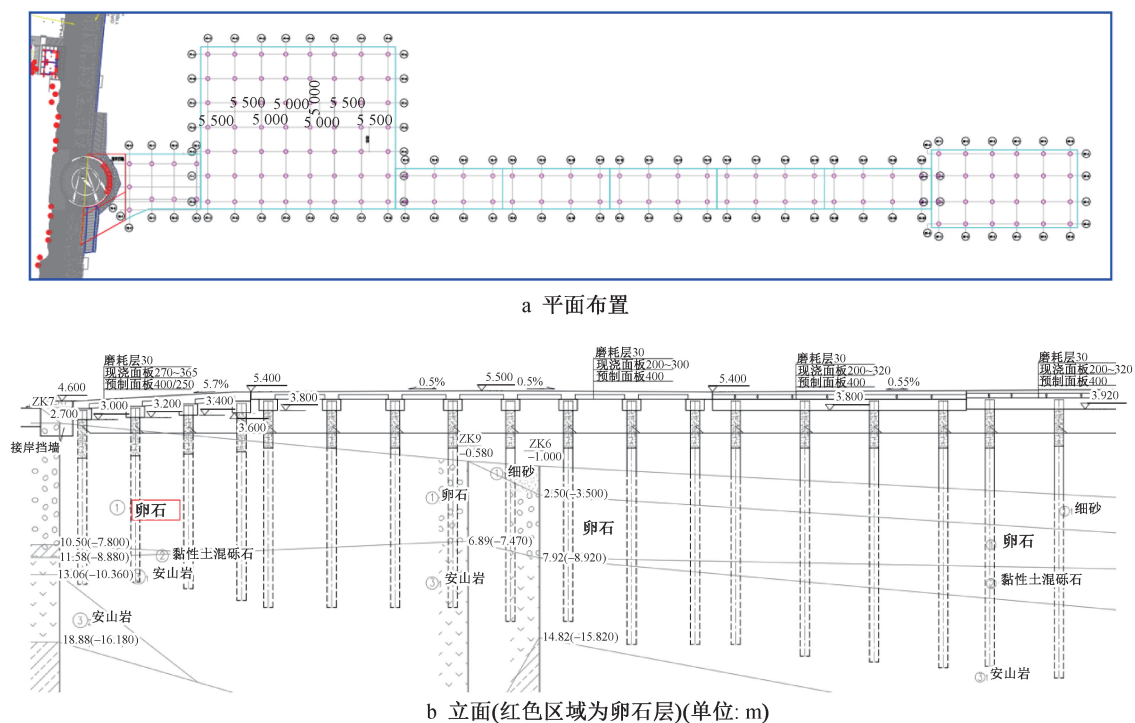


Fig. 1 The pile position

浪冲击,海底及岸滩经历了显著的地貌塑造,形成了明显的海底陡坎和水深变化。岸边则由卵石构成,形成了典型的卵石岸滩。

拟建场区地层主要包括圣萨尔瓦多组和库斯卡特兰组。圣萨尔瓦多组(更新世-全新世)主要由第四纪沉积物和水相沉积物夹杂火山碎屑组成(见图2)。这一地层体现了更新世-全新世时期的沉积特征,涵盖了火山活动带来的各种火山碎屑。库斯卡特兰组(见图3)分布于萨尔瓦多地区的年轻火山链中,主要由熔岩、凝灰岩、浮石、矿渣和火山灰组成,有时夹杂湖泊沉积物。该地层的厚度和演替特征因不同火山而异,地质年代跨度从更新世至全新世,表现为棕色和黑色的化石地层。库斯卡特兰组岩层具有较高孔隙率和显著渗透性,相较于其他地层显示出更高渗透性。



图 2 典型圣萨尔瓦多组

Fig. 2 Typical San Salvador group

在拟建场区内,主要分布有凝灰岩和安第斯-玄武质熔岩流。场区北侧存在 1 条与海岸线平行的断层。

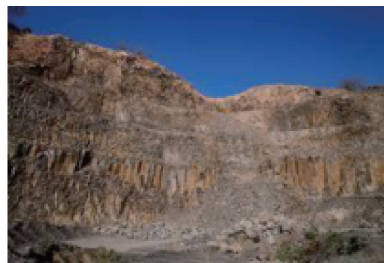


图3 典型库斯卡特兰组
Fig.3 Typical Cuscatlan group

根据资料记载,该断层近期以来未显示出活动迹象。

在拟建场区的勘察深度范围内,岩土层被划分为六大层次和 8 个亚层,如表 1 所示,包括细砂、卵石、黏性土混砾石、安山岩、砾岩、凝灰岩和粉质黏土层,这些岩土层的分布和特性对工程设计和施工具有重要影响。

该区域岩土层主要包括:细砂层(灰色和棕色),状态从松散到密实,局部夹带贝壳碎屑及卵石和砾石,其工程性质为一般;卵石层(灰色和棕色),呈松散~密实状态,主要成分为安山岩,并混有砂砾,工程性质较好;黏性土混砾石层(棕色),从可塑到坚硬,含砾石和卵石,局部可见岩块风化痕迹,工程性质一般;强风化安山岩层(灰色或棕色),坚硬且块状强风化,风化程度不均,局部呈短柱状,工程性质良好;中风化安山岩层(棕褐色),坚硬且孔隙率较高,岩芯呈短柱状,工程性质良好;强风化砾岩

表 1 各工程地质(亚)层地基承载力容许值

Table 1 Allowable bearing capacity of foundation for each engineering geological (sub) layer

层号	岩土名称	地基土容许承载力 f/kPa
① ₁	细砂	120
①	卵石	400
②	黏性土混砾石	200
③ ₁	强风化安山岩	400
③ ₂	中风化安山岩	600
④ ₁	强风化砾岩	500
⑤	中风化凝灰岩	600
⑥	粉质黏土	240

层(棕色、灰白色或黄色),坚硬且块状强风化,风化不均,局部呈短柱状,工程性质良好;中风化凝灰岩层(棕褐色),坚硬且孔隙率较高,岩芯呈短柱状,工程性质良好;粉质黏土层(棕色),硬塑~坚硬状态,干强度高,工程性质良好。上述岩土层的详细描述为项目的地质分析提供了重要依据,有助于在设计和施工过程中进行合理的工程判断和决策。

工程海域海底主要由火山爆发产生的火山灰和落石淤积而成。经过长周期的涌浪推挤作用,上层沉积物形成了厚度为 3~10m 密实夹砂卵石层。现场岸边开挖结果显示,该层卵石的直径主要在 20~30cm,偶尔出现直径达 50~80cm 的大卵石。长期的沉积和涌浪冲击导致卵石间相互嵌压,使得其密度达到 3 850kg/m³,显示出显著坚硬性。

2 沉桩施工可行性与处理方案研究

2.1 沉桩可打性分析

在项目策划阶段,设计单位、施工单位、打桩锤厂家及试验检测单位联合成立了专家组。基于已掌握的岩土工程勘察和设计资料,专家组对桩基的可打入性进行了系统分析。最终,专家组决定采用 HHP14E 型液压冲击锤,其锤芯最大行程为 1.5m,最大锤击能量为 11 000kN。设计选定 $\phi 800\times 20$ 钢管桩(施工图设计为壁厚 18mm)。此外,专家组采用了 GRLWEAP 2010 海工专业版波动方程分析程序,对桩基进行了详细的拟合分析。

本次桩基可打入性分析基于岩土工程勘察报告提供的桩基设计参数。桩侧沉桩阻力按静态极限承载力的 80%进行考虑,桩端沉桩阻力则按静态极限承载力的 100%进行计算。为确保安全,最大锤击压应力控制在屈服强度的 80%以内。分析中采用了同一根钢管桩的连续沉桩情况。波动方程分析的计算结果如图 4、表 2 所示。以下为具体分析过程描述。

采用 HHP14E 型液压锤进行沉桩施工,初始冲程设置为 0.5m,并逐步增加能量。在 100%额定能

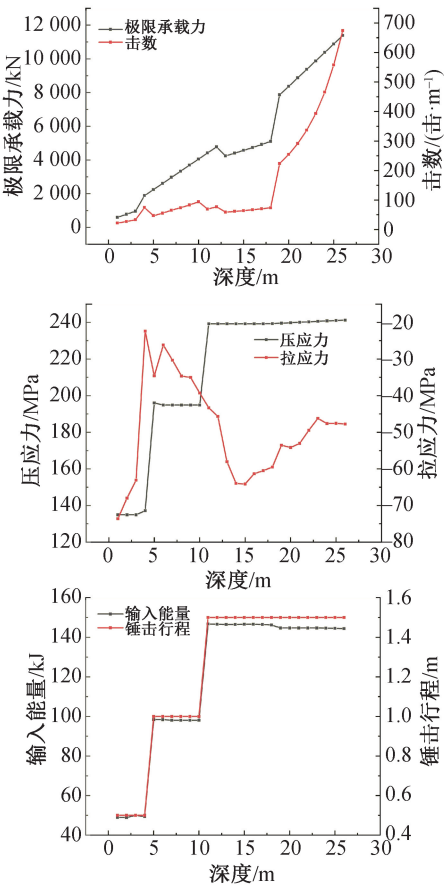


图 4 波动方程分析结果

Fig. 4 Wave equation analysis results

表 2 钢管桩可打性波动方程分析

Table 2 Wave equation analysis of steel pipe pile drivability

深度/ m	极限承载 力/kN	击数/ (击·m ⁻¹)	压应力/ MPa	拉应力/ MPa	输入能 量/kJ	锤击行 程/m
1	595.6	21.7	134.920	-73.605	49.0	0.50
2	776.6	26.9	134.919	-67.984	48.9	0.50
3	957.5	32.7	134.940	-63.082	50.0	0.50
4	1 880.0	74.3	137.175	-22.394	49.4	0.50
5	2 241.9	46.7	196.007	-34.579	98.4	1.00
6	2 603.8	55.1	194.879	-26.169	98.4	1.00
7	2 965.7	65.2	194.879	-30.317	98.1	1.00
8	3 327.5	73.8	194.879	-34.652	98.1	1.00
9	3 689.4	83.0	194.879	-35.027	98.1	1.00
10	4 051.3	94.0	194.879	-39.275	98.1	1.00
11	4 413.1	69.2	239.268	-43.312	146.7	1.50
12	4 775.0	76.8	239.268	-45.669	146.6	1.50
13	4 237.7	58.8	239.268	-58.029	146.5	1.50
14	4 397.6	61.2	239.268	-63.955	146.5	1.50
15	4 563.6	63.8	239.268	-64.118	146.6	1.50
16	4 735.6	66.7	239.268	-61.316	146.6	1.50
17	4 913.8	70.0	239.268	-60.480	146.5	1.50
18	5 098.0	73.8	239.338	-59.494	146.2	1.50
19	7 862.4	223.3	239.587	-53.528	144.7	1.50
20	8 365.0	254.2	239.841	-54.169	144.7	1.50
21	8 867.6	291.1	240.094	-53.015	144.7	1.50
22	9 370.2	336.4	240.346	-49.458	144.7	1.50
23	9 872.8	392.8	240.597	-46.203	144.7	1.50
24	10 375.4	465.2	240.845	-47.613	144.6	1.50
25	10 878.0	557.8	241.059	-47.561	144.5	1.50
26	11 380.6	674.1	241.265	-47.755	144.4	1.50

量下,桩尖入土深度达到约 18m 时,贯入度迅速收敛至<5mm;当桩尖入土深度达到约 20m 时,贯入度进一步降低至<4mm。在桩尖沉至预定深度 26.0m 时,停锤贯入度已<1.5mm,总锤击次数为 3 961 次。按桩尖入土深度为 20m 时(此时桩尖穿透约 1.8m 强风化安山岩),停锤贯入度为 3.9mm,总锤击次数为 1 453 次。最大锤击压应力为 239.8MPa,最大有效能量为 147kJ。

理论分析结果表明,在无大粒径卵砾石的正常地质条件下,HHP14E 型液压锤能有效完成沉桩任务。然而,当桩尖遇到大直径卵石时,桩的贯入将受到显著阻碍。基于此,最终决定采用 HHP14E 型液压冲击锤进行沉桩施工,并预先配备 2 台冲孔设备以备不时之需。对于无法顺利沉入的桩,将采用冲孔再沉桩工艺进行处理,以确保桩基施工顺利进行和工程质量稳定。

2.2 可正常打入情况

在距岸边 120m 范围内,共成功打入 91 根桩至设计标高,桩的入土深度介于 15~20m;锤击次数通常为 500~1 000 次,最终贯入度在 5~20mm。对其中 4 根桩进行高应变测试结果表明,这些桩的承载力均满足设计要求。

2.3 单桩无法打入处理方案

在距岸边 65m 范围内,69 根桩中有 3 根未能正常打入。其中,最东侧 1 根桩位于距岸边 55m 处,而最西侧的 2 根桩分别位于距岸边 30,65m 位置。这 3 根桩在锤击 2 500~3 500 次后,入土深度约为 8.5m,贯入度均<1mm。尽管现场使用高强度合金钢制造的桩尖锥头,并且在锥头内部填充混凝土,锥头仍被挤压变形,未能有效挤开卵石以形成孔洞。

第 1 根和第 2 根桩间间隔 2d。经过与设计单位沟通讨论,鉴于码头主要用于渔业,且上部荷载主要为行人荷载,因此重点考虑了涌浪对顶托梁板产生的桩基抗拔荷载。最终决定对第 2 根桩进行抗拔试验。试验结果显示,在入土深度为 8.5m 时,该桩的抗拔承载力满足设计要求。因此,调整了停锤标准:桩基的最小入土深度应≥8m,贯入度<5mm 时桩体入土深度应≥1m。

第 3 根桩在入土深度达到 7.5m 时,其贯入度为 0.2mm,桩身发生了倾斜。经拔出检查发现,桩尖遭遇了大直径且坚硬卵石,导致桩尖严重变形。在与设计单位协商后,决定将该桩的桩位向海侧平移 1.5m。调整后的位置允许桩顺利打入至设计标高,从而成功完成沉桩作业。

项目部与设计单位研究决定,针对沉桩过程中

遇到的实际情况,采用预判钢管桩打入可能性的策略,并提前实施截桩和桩尖加固处理措施。具体而言,当沉桩的入土深度达到 10~12m 时,为确保桩身防腐涂层有效入土,需将下一根钢管桩的入土深度设定为 12m,并从桩尖一端截去相应长度,同时在桩尖内部焊接加强板。该方法经过应用后,能在距岸边 65~120m 范围成功完成钢管桩沉桩工作。然而,此方法增加了人工和机械设备成本。这一决策和处理措施的有效性为项目的顺利推进提供了保障,但也须考虑其对成本的影响。

2.4 群桩无法打入处理方案

在距岸边 120~150m 范围,临时钢栈桥的桩基入土深度均无法>6m。经过与钢栈桥设计单位充分沟通和技术验算,最终决定采取增加桩基数量并采用“板凳”式布置方案,以确保钢栈桥整体稳定性。该方案通过增设更多桩基来分布荷载,从而补偿桩基入土深度不足,保证了钢栈桥在设计荷载条件下的稳固性。这一措施有效提升了结构安全性和可靠性,并为项目顺利推进提供了保障。

在距岸边 120~140m 范围,连续 6 根永久结构工程桩未能达到设计要求,即未能沉入泥面以下 8m 深度。通过综合分析临时钢栈桥的沉桩情况、地质勘探数据及已沉桩分布情况,工程总承包单位与设计院专家组发现该区域地质条件存在明显的分区差异。进一步向海侧推进沉桩的难度显著增加,导致群桩无法顺利沉入。为解决这一问题,专家组决定借鉴嵌岩桩的施工原理,将沉桩工艺调整为引孔再沉桩,以确保后续 35 根桩能顺利完成施工。这一调整旨在有效解决现有问题并保证工程顺利推进。

3 冲孔再沉桩施工工艺

3.1 冲孔打桩机设备选型

在项目筹备阶段,已预见到部分桩可能需采用“先冲孔后沉桩”施工工艺,为此,设备进场时已采购了 2 台冲孔打桩机。为了确保成孔后的钢管桩能获得充分的桩周摩擦力,现场采用直径 650mm、重 7t 冲孔锤。此措施确保了孔径≤800mm,从而有效保证了后续沉入的钢管桩能获得足够的桩周摩擦力,以满足设计规范和工程要求。

3.2 施工工艺流程

1)对施工场地进行彻底清理,排除任何可能影响施工的障碍物,并安装和调试设备,确保冲孔设备及辅助机械处于良好工作状态。随后依据施工图纸对桩位进行精确测量和放样,确保桩位标定的准确性。

2)在冲孔作业中,采用专用冲孔设备进行钻孔

操作,严格控制孔径和深度,确保符合设计要求。根据不同地质条件,合理调整冲孔速度,以防止孔壁塌陷或孔位偏移等。冲孔完成后,对孔内进行清理,清除泥土、碎石等杂物,确保孔壁稳定性。

3)钢管桩安装过程中,使用起重机将钢管桩对准成孔位置,并通过液压锤或其他沉桩设备缓慢沉桩。整个过程中需严格控制沉桩速度和桩体垂直度,直至钢管桩达到设计标高。在沉桩完成后,对桩顶进行固定处理,并根据需要对桩身进行加固,如焊接加强板等,以确保桩身结构整体稳定。

4)施工后,采用高应变或低应变测试等专业检测手段,评估桩基承载力和结构稳定性,确保其满足设计规范和标准。所有施工过程中的关键参数(包括沉桩深度、锤击次数、贯入度等)均需详细记录,以备监理单位和相关部门质量验收。施工结束后,及时清理施工现场,为后续工程施工创造良好作业环境。

3.3 关键施工工艺

1)搭建冲孔平台。通过导向架和经纬仪进行精确定位,使用振动锤将临时平台桩插入土层,随后采用液压冲击锤对其进行锤击,确保桩基入土深度 $\geq 5\text{m}$,以保证辅助桩稳定性。在辅助桩上安装钢抱箍,并在钢抱箍上架设贝雷梁,形成临时平台。临时平台西侧与钢栈桥相连,根据设计验算,钢栈桥桩入土深度约 6m 可确保 100t 履带式起重机沉桩作业稳定性,因此临时平台桩入土约 6m 完全可满足 10t 冲孔设备施工稳定要求。冲孔平台如图 5 所示。

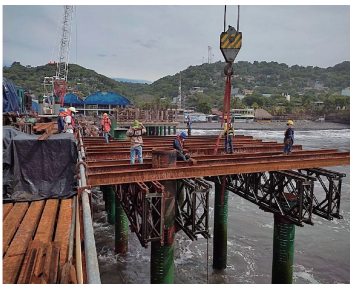


图 5 冲孔平台
Fig. 5 Punching platform

2)冲孔。在冲孔过程中,采用振动锤插入 $\phi 810$ 护筒,护筒入土深度控制在 3~4m,以防止泥浆外漏。施工过程中采用黏土配制泥浆,泥浆相对密度保持在 1.2~1.4,确保冲击破碎的碎石能有效悬浮。冲孔设备选用 $\phi 650$ 冲孔锤,确保成孔孔径小于永久工程桩外径,从而有效保障桩侧摩阻力不会显著降低。每下降 0.5m 进行一次清渣操作,直到贯穿

卵石层。该冲孔工艺借鉴了冲孔灌注桩施工技术,重点关注塌孔和斜孔控制,确保泥浆合理使用与管理,以提高施工效率和桩基稳定性。

3)插桩。在穿越卵石层后,立即采用振动锤拔出护筒,并迅速利用振动锤将永久结构桩沉入预定孔位。桩体下沉操作应持续至振动锤无法再使桩体进一步下沉,或直至桩顶达到临时平台标高。该过程要求操作精准、衔接紧密,以确保永久桩稳固性和定位精度,防止因土层扰动或孔壁坍塌导致的工程质量问题。最后一分段冲控沉桩如图 6 所示。

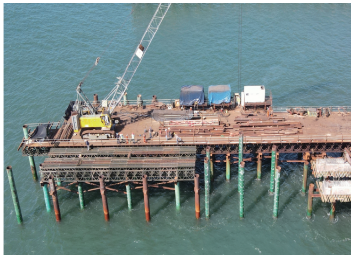


图 6 最后一分段冲孔沉桩
Fig. 6 The last section of the punching pile

4)拆除冲孔平台。在完成某一结构段内全部桩基的初次打入作业后,需拆除冲孔平台,并有序拔除辅助桩。随后,采用液压冲击锤将永久结构桩继续锤击至设计标高,或确保其贯入度和入土深度满足设计要求。此过程中需严格控制施工顺序,保证桩基承载力和结构稳定性,以满足工程设计的各项技术要求。

通过采用冲孔再沉桩工艺,35 根桩均能顺利打入至设计深度,或穿透上部卵石层打入至原设计持力层。对其中 3 根桩进行高应变测试,基于侧摩阻力计算其抗拔承载力,测试结果表明,各桩的抗拔承载力均满足设计规范要求,确保了结构稳定性和可靠性。

3.4 工效分析

在不计入钢栈桥推进时间的前提下,若直接进行永久结构桩的打入作业,地质条件较好的情况下,日均可完成沉桩 2 根;在地质条件稍差但仍可打入的情况下,日均沉桩 1 根。以 1 个结构段 8 根桩为例,预计完成该段桩基施工约需 5d 时间。

采用冲孔再沉桩工艺,以 1 个结构段 8 根永久桩为例计算,首先打入 6 根临时冲孔平台辅助桩,耗时 3d;随后进行钢抱箍安装及平台搭建,耗时 3d。受施工场地限制,现场仅可配备 1 台冲孔打桩机,冲孔及初次沉桩作业预计需 2d/根(工作时间为 10h/d),总耗时 16d。平台拆除及辅助桩拔出工作预计需 3d,复打 8 根永久桩耗时 2d。综上所述,整

个工艺周期为 27d,平均每根桩施工时间约为 3.5d。

4 桩基高应变检测技术

4.1 基本原理

桩基高应变检测主要基于动力学原理,通过在桩顶施加冲击荷载,利用传感器测量桩顶应变和动力响应。通过分析这些数据,结合桩的物理特性和冲击荷载特点,可推算出桩基的静态承载力和桩侧摩阻力。其主要原理为:高应变检测技术基于应力波传播理论,通过在桩顶施加冲击荷载产生应力波在桩体中传播。该技术依赖波动力学原理,其中应力波在桩体中的传播特性(如速度、形态等)与桩体的弹性模量、密实度及桩身的几何特征紧密相关。具体而言,应力波可分为纵波和横波,分别沿桩体的轴向和横向传播。

4.2 检测方法

高应变检测的数据分析通常采用动态响应分析方法,常见的分析工具包括 Pile Driving Analyzer (PDA) 和 Case Pile Wave Analysis Program (CAPWAP),其中 PDA 用于实时记录应变数据并进行初步分析;而 CAPWAP 则用于更为精细的数据处理和结果解读,能提供桩基承载力、桩身阻力分布及可能的施工缺陷信息。

本项目采用 PDA 分别对桩号为 YQ-16-b, MT-6-C, MT-2-A 的 3 根桩基进行了现场动态测试与分析。PDA 打桩分析仪通过实时监测桩基在打入过程中的应力、应变及振动特性,获取桩基的动态响应数据。基于这些数据,利用 CAPWAP 进行了后续的数据处理与分析,得出了桩基承载力、桩身完整性及施工性能等关键指标。

经过 PDA 测试和 CAPWAP 分析,桩基的静态极限承载力得到有效评估。初步分析结果显示,桩基承载力满足设计要求,并具有较大安全裕度。具体数据显示,桩基极限承载力分别为 6 986,6 899, 5 888kN,满足桩基设计 4 791kN 的要求。

在 PDA 测试过程中,桩体的应力波形未出现异常反射,表明桩身未存在显著缺陷或断裂。通过对应力波传播时间和反射波的分析,进一步确认桩身结构完整,未发现明显施工缺陷。此外,桩体在纵向上未表现出应力集中或局部变形现象,显示出良好的桩身完整性。

4.3 检测优点

高应变检测技术具备以下显著优势:①非破坏性,该技术在检测过程中不会对桩体产生额外损伤,特别适用于对施工现场的无损检测;②实时性,

能在短时间内获取检测数据,便于施工过程中及时反馈并调整施工方案;③适用性广,该技术可应用于多种桩型,包括预制桩与灌注桩,适应性强;④检测精度高,通过动态响应数据的精确分析,能对桩基承载力、结构完整性及潜在缺陷进行准确评估。

5 结语

1)通过对钢管桩可打性及相关处理措施的详细研究,结合高应变检测技术应用,全面验证了该工艺在提升桩基承载力与结构稳定性方面的有效性。检测结果显示,冲孔再沉桩工艺能充分适应复杂的地质条件,特别是在应对大粒径卵石和密实地层时,展现出优良的施工性能和稳定性。

2)尽管该工艺流程复杂,且施工周期较长,但在确保工程质量和结构安全性方面表现优异。

3)研究表明,冲孔再沉桩工艺为复杂地质条件下的桩基施工提供了可靠的技术保障,具有重要的工程应用价值。

参考文献:

[1] 雷文,凌志达. 玻璃钢的耐腐蚀性能及其在防腐工程中的应用[J]. 全面腐蚀控制,2000,14(6):45-48.
LEI W, LING Z D. Corrosion resistance of FRP and its application in anti-corrosion engineering[J]. Total corrosion, 2000, 14(6): 45-48.

[2] 吴文峰. 液压冲击锤施工应用与推广[J]. 中国港湾建设, 2003,23(1):42-45.
WU W F. Pile driving with hydraulic jumper hammer and popularization of the hammer[J]. China harbour engineering, 2003,23(1):42-45.

[3] 高红成,范小培. 复杂地质条件下钢管嵌岩桩的施工技术[J]. 中国水运(下半月),2019(12):229-230.
GAO H C, FAN X P. Construction technology of steel pipe rock-socketed pile under complex geological conditions[J]. China water transport, 2019(12):229-230.

[4] 黄增财,彭立志,吴健. 海上超长直径钢管桩基础施工技术[J]. 施工技术,2005,34(S1):170-173.
HUANG Z C, PENG L Z, WU J. Construction technologies for marine construction of foundations of ultra-long large diameter steel pipe piles[J]. Construction technology, 2005, 34(S1): 170-173.

[5] 胡晓伦,杨江虎. 杭州湾大桥钢管桩沉桩施工工艺[J]. 桥梁建设,2006,36(1):52-55.
HU X L, YANG J H. Construction technology for driving of steel pipe piles of Hangzhou Bay Bridge[J]. Bridge construction, 2006,36(1):52-55.

[6] 赵刘群,娄学谦,胡兴昊,等. 密实含砂碎石和卵石地层钢管桩沉桩试验研究[J]. 水运工程,2022(9):166-171,209.
ZHAO L Q, LOU X Q, HU X H, et al. Experimental study of steel pipe pile driving in dense sand-bearing gravel and cobble stratum[J]. Port & waterway engineering, 2022(9):166-171,209.